



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

Mathyas Calaes de Andrade Almeida

Powder de Escória de Aciaria em Concreto de Alto Desempenho

Ouro Preto

2017

Mathyas Calaes de Andrade Almeida

Powder de Escória de Aciaria em Concreto de Alto Desempenho

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

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientadores: Prof. D.Sc Ricardo Andre Fiorotti Peixoto

Prof^a. M.Sc. Julia Castro Mendes

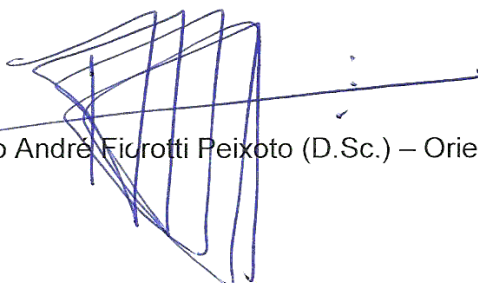
Ouro Preto

2017

Mathyas Calaes de Andrade Almeida

POWDER DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 12 de Maio de 2017, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Ricardo André Fiuorotti Peixoto (D.Sc.) – Orientador – UFOP



Prof. Julia Castro Mendes (M.Sc.) – Orientadora – FaSaR



Prof. José Maria Franco de Carvalho (M.Sc.) – UFV

RESUMO

Segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2016, do Instituto Aço Brasil, a indústria siderúrgica brasileira é um dos componentes de maior destaque na economia do país. Durante o processo siderúrgico são gerados materiais residuais, chamados de subprodutos e resíduos. Dentre eles, destacam-se a escória de alto-forno, gerada na fabricação do ferro gusa e a escória de aciaria (EA), gerada na produção do aço. De acordo com o Relatório de Sustentabilidade de 2016, em 2015 o total de subprodutos e resíduos gerados foi de 19,8 milhões de toneladas (594 kg / t de aço bruto), dos quais 28% foram EA. Ou seja, foram gerados, aproximadamente, 5,5 milhões de toneladas de EA, sendo que 16% (880 mil toneladas) eram destinados para estoque ou disposição final, contra apenas 2% da escória de alto forno (170 mil toneladas). O acúmulo da EA pode gerar inúmeros danos ambientais e sociais, sendo necessário trabalhar para melhorar seu aproveitamento, assim como tem sido feito com a escória de alto forno. A construção civil surge como mercado alternativo para o emprego da EA, utilizando-a na produção de cimento e concreto. Atualmente este uso tem sido pouco explorado, já que, segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2016, apenas 2% da EA gerada foi utilizada na produção de cimento em 2015. Número que pode melhorar e contribuir para a redução de estoque e disposição desse material. Uma alternativa de aplicação é a sua utilização como *powder* em concreto de cimento Portland de alto desempenho, mas, para comprovar essa possibilidade, é preciso analisar as propriedades químicas e físicas da EA, sua interação com o cimento Portland e os dados do concreto produzido com essa mistura, como trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Desta forma, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a possibilidade de utilização de *powder* EA como adição em concreto de alto desempenho, buscando ampliar seu reaproveitamento na construção civil, além de reduzir a demanda por produtos cimentícios e assim mitigar o impacto ambiental dos setores siderúrgico e de construção civil.

Palavras chave: Escória de aciaria; Concreto sustentável; *Powder* de escória de aciaria; Concreto de alto desempenho.

ABSTRACT

According to the 2016 Sustainability Report, of the Instituto Aço Brasil, the Brazilian steel industry is one of the most prominent components of the country's economy. During the steelmaking process, residual materials are generated, called by-products and wastes. Among them, highlight the blast furnace slag, generated in the pig iron manufacture and the Steel Slag (SS), generated in the steel production. According to the 2016 Sustainability Report, in 2015 the total by-products and waste generated was 19,8 million tons (594 kg / t of raw steel), of which 28% were SS. In other words, approximately 5,5 million tons of SS were generated, of which 16% (880.000 tons) were destined for stock or final disposal, against only 2% of the blast furnace slag (170.000 tons). The accumulation of SS can cause innumerable environmental and social problems, being necessary to work to improve your exploitation, as it has been done with the blast furnace slag. The civil construction comes up as alternative market for the SS employ, using it in the production of cement and concrete. Nowadays this use has been little explored, since, according to the 2016 Sustainability Report, only 2% of the SS generated was used in the cement production in 2015. Number that can be improved and contribute to the reduction of stock and disposal of this material. One application alternative is the use as powder addition in Portland cement high performance concrete. But, to prove this possibility, is necessary to analyze the chemical and physical properties of the SS, your interaction with the Portland cement and the data of the concrete produced with this admixture, like workability, mechanical strength and durability, both in the fresh and hardened state. In this way, this work presents a bibliographical review about the possibility of using the SS powder as high performance concrete addition, seeking to extend the its reuse in the civil construction, in addition to reducing the demand for cement products and thus, mitigate the environmental impacts of the steel and civil construction sectors.

Key words: Steel slag; Sustainable concrete; Steel slag powder; High performance concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo simplificado de produção do aço. (Instituto Aço Brasil)	15
Figura 2: (a) Geração de coprodutos e resíduos por tipo; (b) Destinação das escórias de aciaria e outras escórias (IABR, 2016).	17
Figura 3: Aspecto da Escória de Aciaria bruta (https://blogreciclos.wordpress.com/2016/10/03/beneficiamento-da-escoria-de-aciaria/).	19
Figura 4: Micrografias SEM de quatro amostras de escória de aciaria, com diferentes tamanhos de partículas (SHI, CHEN, et al., 2015).	22
Figura 5: Moinho de bolas utilizado na preparação do powder de escória de aciaria (ZHAO, WANG, et al., 2016).	22
Figura 6: Aparência da escória de aciaria e do cimento Portland CP V-ARI (GEYER, 2001).	23
Figura 7: Sistema de moagem do moinho a jato de vapor superaquecido. (1) Alimentador de parafuso, (2) funil, (3) classificador, (4) câmara de esmagamento, (5) bocal Laval, (6) filtro de saco adequado para vapor superaquecido e (7) ventilador de ar induzido (SHI, CHEN, et al., 2015).	23
Figura 8: Escória de aciaria: (a) como recebida, (b) depois de trituração e (c) depois de moída (ROSLAN, ISMAIL, et al., 2015).	24
Figura 9: Calor de hidratação, com temperatura de cura de 25°C, para amostras de pasta com: (C) cimento Portland puro, (S1) 85% cimento Portland e 15% PEA, (L1) 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (S3) 55% cimento Portland e 45% PEA e (L3) 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).	35
Figura 10: Calor de hidratação, com temperatura de cura de 50°C, para amostras de pasta com: (C-G) cimento Portland puro, (S1-G) 85% cimento Portland e 15% PEA, (L1-G) 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (S3-G) 55% cimento Portland e 45% PEA e (L3-G) 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).	35

- Figura 11:** Evolução do calor durante a hidratação do (CS) PEA mais grosso e (FS) PEA mais fino (QIANG e PEIYU, 2010).36
- Figura 12:** Evolução do calor durante a hidratação da PEA sob condição de pH diferente (CS_NaOH) (QIANG e PEIYU, 2010).....36
- Figura 13:** Fluidez de diferentes misturas de argamassa. Amostras: (1) Cimento Portland puro; (2) 50%cimento Portland + 50%EAF; (3) 50%cimento Portland + 50%PEA A; (4) 50%cimento Portland + 50%PEA B; (5) 50%cimento Portland + 50%PEA C; (6) 50%cimento Portland + 50%PEA D; (7) 50%cimento Portland + 15%PEA A + 35%EAF; (8) 50%cimento Portland + 15%PEA B + 35%EAF; (9) 50%cimento Portland + 15%PEA C + 35%EAF; (10) 50%cimento Portland + 15%PEA D + 35%EAF; (11) 50%cimento Portland + 25%PEA A + 25%EAF; (12) 50%cimento Portland + 25%EA B + 25% EAF; (13) 50%cimento Portland + 25%PEA C + 25%EAF; (14) 50%cimento Portland + 25%PEA D + 25%EAF (WANG, YAN e MI, 2012).37
- Figura 14:** Tempos de início e fim de pega de concreto com EAF ou com mistura mineral de EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).38
- Figura 15:** Distribuições dos tamanhos dos poros da pasta endurecida a 25°C. Amostras: (PC) pasta de cimento Portland puro, (PS1) pasta com 85% cimento Portland e 15% PEA, (PL1) pasta com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (PS3) pasta com 55% cimento Portland e 45% PEA e (PL3) pasta com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).40
- Figura 16:** Distribuições dos tamanhos dos poros da pasta endurecida a 50°C. Amostras: (PC-G) pasta de cimento Portland puro, (PS1-G) pasta com 85% cimento Portland e 15% PEA, (PL1-G) pasta com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (PS3-G) pasta com 55% cimento Portland e 45% PEA e (PL3-G) pasta com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).41
- Figura 17:** Porosidade do concreto (WANG, YANG e YAN, 2013).....41

- Figura 18:** Influência da PEA na permeabilidade do concreto: (a) 25% de substituição e (b) 45% de substituição (WANG, YANG e YAN, 2013).42
- Figura 19:** Profundidade de permeação de água no concreto com EAF ou com EAF-PEA (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).43
- Figura 20:** Permeabilidade a cloretos do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, et al., 2013).44
- Figura 21:** Profundidade de carbonatação no concreto com EAF ou com EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).45
- Figura 22:** Retração do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, et al., 2013).46
- Figura 23:** Retração do concreto contendo apenas EAF ou misturas EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).47
- Figura 24:** Resistência à flexão de argamassas de cimento contendo amostras de EA diferentes: (0) cimento Portland puro, (1)70% cimento Portland + 30%EA, (2)70% cimento Portland + 30%PEA1, (3)70% cimento Portland + 30% PEA2, (4)70% cimento Portland + 30% PEA3 (SHI, CHEN, et al., 2015).48
- Figura 25:** Resistência à compressão do concreto com PEA (ROSLAN, ISMAIL, et al., 2015).49
- Figura 26:** Resistência à compressão de argamassas de cimento contendo amostras de EA diferentes: (0) cimento Portland puro, (1)70% cimento Portland + 30% EA comum, (2)70% cimento Portland + 30%PEA1, (3)70% cimento Portland + 30%PEA2, (4)70% cimento Portland + 30%PEA3 (SHI, CHEN, et al., 2015).49

Figura 27: Resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de PEA, após 3 dias de cura, a uma temperatura de cura de: (a) 25°C e (b) 50°C. Amostras: (MC / MC-G) argamassa de cimento Portland puro, (MS1 / MS1-G) argamassa com 85% cimento Portland e 15% PEA, (ML1 / ML1-G) argamassa com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (MS2 / MS2-G) argamassa com 70% cimento Portland e 30% PEA, (ML2 / ML2-G) argamassa com 70% cimento Portland e 30% pó de calcário, (MS3 / MS3-G) argamassa com 55% cimento Portland e 45% PEA e (ML3 / ML3-G) argamassa com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).50

Figura 28: Resistência à compressão de concreto com EAF e concreto com EAF-EA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).51

Figura 29: Resistência à compressão do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, et al., 2013).52

Figura 30: Resistência à abrasão do concreto com EAF e com EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variações nas composições químicas das escórias de aciaria.	25
Tabela 2: Artigos utilizados para avaliar a utilização do powder de escória de aciaria.	29
Tabela 3: Composição química e área superficial das amostras de PEA (EA) e de EAF utilizadas no experimento (WANG, YAN e MI, 2012).	31
Tabela 4: Proporções das misturas de concreto. GGBFS é EAF, DR é resíduo de dessulfuração, SS é sulfato de sódio e DG é gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).	32
Tabela 5: Propriedades cimentícias do cimento com PEA (SHI, CHEN, et al., 2015)	39
Tabela 6: Fluxo elétrico de Coulomb do concreto com EAF ou com EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).	42
Tabela 7: Profundidade de carbonatação do concreto com 28 dias (QIANG, PEIYU, et al., 2013).	45

LISTA DE SIGLAS

CAD – Concreto de Alto Desempenho

EA – Escória de Aciaria

EAF – Escória de Alto Forno

PEA – *Powder* de Escória de Aciaria

SUMÁRIO

RESUMO.....	2
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS	10
SUMÁRIO.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Ciclo de Produção do Aço.....	15
2.2 Produção da Escória de Aciaria	16
2.3 Uso de Escória em Matrizes Cimentícias.....	17
2.3.1 Beneficiamento da Escória de Aciaria	19
2.4 Powder de Escória de Aciaria	21
2.4.1 Interação do Powder de Escória de Aciaria com Matriz Cimentícia.....	25
2.4.2 Durabilidade	26
2.5 Concreto de Alto Desempenho	27
3 METODOLOGIA.....	29
4 RESULTADOS	30

4.1	Metodologia dos artigos estudados.....	30
4.2	Efeitos do Powder de EA Sobre o Estado Fresco do Concreto	34
4.2.1	Calor de Hidratação.....	34
4.2.2	Trabalhabilidade	37
4.2.3	Tempo de Pega	38
4.3	Efeitos do Powder de EA Sobre o Estado Endurecido do Concreto	39
4.3.1	Porosidade e Permeabilidade.....	39
4.3.2	Carbonatação	44
4.3.3	Retração	46
4.3.4	Resistência Mecânica.....	47
4.3.5	Resistência à Abrasão.....	52
5	CONCLUSÃO	54
6	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Escória de Aciaria (EA) é o subproduto do refino de ferro gusa em aciarias a oxigênio e do derretimento de sucatas de ferro e aço em aciarias elétricas, para posterior transformação em aço líquido.

O total de subprodutos e resíduos gerados pela indústria siderúrgica no país foi de 19,8 milhões de toneladas (594 kg / t de aço bruto), dos quais 28% foram de EA, ou seja, foram gerados, aproximadamente, 5,5 milhões de toneladas de EA, sendo que, 16% (880 mil toneladas) foram destinados para estoque ou disposição final, contra apenas 2% da EAF (170 mil toneladas) (IABR, 2016).

O depósito de EA demanda grandes área e resulta em vários problemas ambientais sérios (YAN, WANG e MI, 2012). Por isso, é necessário investir no reaproveitamento desse subproduto e a construção civil surge como consumidor potencial, já que o concreto é o material mais utilizado no setor e a EA possui inúmeras possibilidades de aplicação no mesmo, como ligante, agregado e adição (*powder*). Essas substituições levam à economia de recursos naturais como areia de rio, pedra britada e energia, que é utilizada para a fabricação do cimento. O que auxilia na redução dos ônus sociais e ambientais da construção civil.

O principal componente do concreto convencional é o Cimento Portland, cuja produção demanda grande consumo energético e de matéria-prima (especialmente o calcário, cuja exploração causa grandes danos ambientais como desmatamento, alteração de relevo e geração de resíduos), tornando-o um material muito oneroso em aspectos ambientais. A aplicação de EA como *powder* no concreto é uma alternativa para reduzir a necessidade de utilização do cimento Portland, produzindo, assim, um concreto sustentável, menos agressivo ambientalmente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar, através de revisão de literatura, a aplicabilidade de *Powders* de Escória de Aciaria (PEA) como adição em concretos de cimento Portland, mais especificamente, em concretos de alto desempenho.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as vantagens e limitações da EA;
- Estudar as propriedades físicas e químicas do PEA;
- Avaliar os efeitos do PEA no concreto nos estados fresco e endurecido;
- Avaliar a viabilidade técnica deste produto em matrizes cimentícias de alto desempenho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciclo de Produção do Aço

Segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2016, do Instituto Aço Brasil, as matérias-primas envolvidas na produção do aço são, basicamente, minério de ferro, carvão e cal. A sua fabricação pode ser dividida em três etapas, sendo elas: preparação da carga, redução, refino e laminação. A figura 1 mostra o processo de forma simplificada.

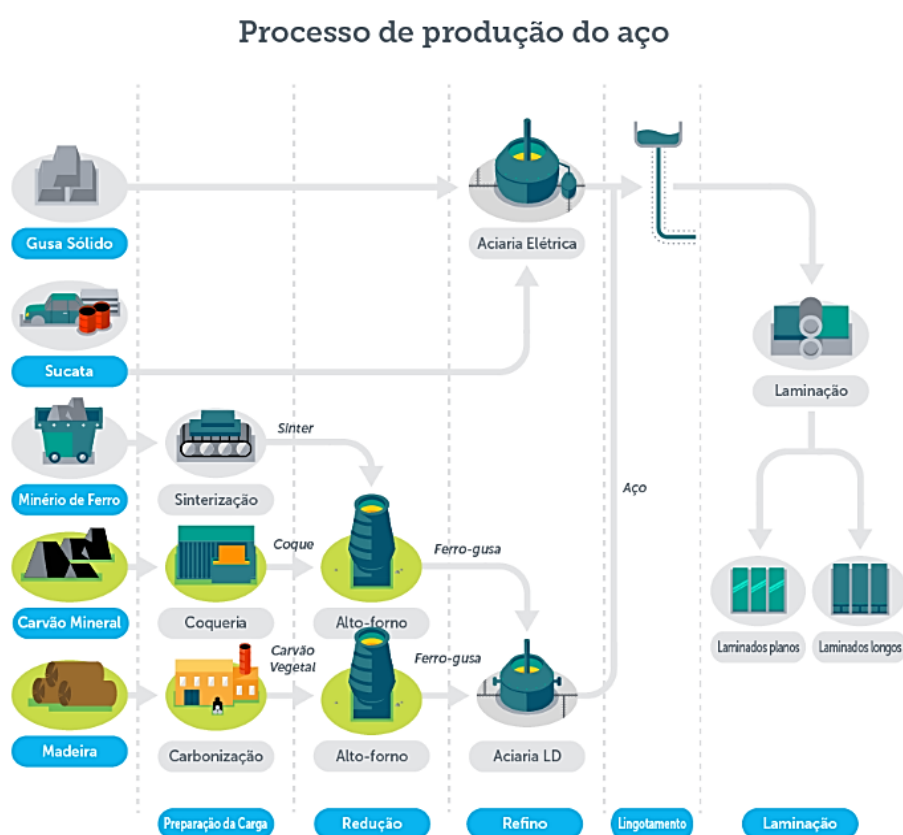


Figura 1: Fluxo simplificado de produção do aço. (Instituto Aço Brasil)

Durante a preparação da carga, o carvão é processado na coqueria e transformado em coque; a maior parte do minério de ferro é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque, resultando no sinter. Na redução, o coque, o sinter e outros materiais são carregados no alto-forno, onde oxigênio aquecido é soprado pela parte de baixo do forno. O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde os metais e dá início ao processo de redução do minério de ferro em ferro gusa, uma liga de ferro com alto teor de carbono. No refino, o ferro gusa líquido é levado para a aciaria a

oxigênio e o ferro gusa sólido e sucata de ferro e aço são levados para a aciaria elétrica, onde são transformados em aço líquido. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semiacabados, lingotes e blocos, que são processados por laminadores e transformados em produtos laminados, na etapa de laminação (IABR, 2016).

2.2 Produção da Escória de Aciaria

Nas aciarias a oxigênio, também conhecidas como conversores LD (L e D são as iniciais de duas cidades austríacas, Linz e Donawitz), oxigênio gasoso em alta pressão é injetado no ferro gusa líquido, proveniente da etapa de redução (SOUZA, 2007). O oxigênio gasoso, de pureza elevada, injetado no ferro gusa líquido, queima o carbono e o silício presentes no mesmo, causando um aumento na temperatura (SOUZA, 2007). Durante o processo, são adicionados fundentes e fluxantes como a cal (CaO), a cal dolomítica (CaO.MgO) e a fluorita (CaF_2), que se combinam com os óxidos, gerados a partir das impurezas presentes, para formar a EA, responsável pela remoção das impurezas da massa líquida. Ao ser vazada do conversor LD, a EA é despejada em pátios para ser resfriada ao ar livre e solidificar. Depois de ser resfriada, a EA é britada e depois separada em granulometrias diferentes, através de correias rolantes (GEYER, 2001). Em geral, ela passa por uma separação magnética, já que ainda carrega consigo grande quantidade de material metálico que pode ser reaproveitado posteriormente, no próprio conversor. Em média, 30% da EA gerada é composta por material metálico que pode ser reaproveitado na própria aciaria (GEYER, 2001). Parte da fração que não é magnética é reutilizada no alto forno, na aciaria e na sinterização. A EA remanescente, separada em granulometrias (bitolas) diferentes, é então destinada a outras utilizações, como na Construção Civil ou na agricultura, como corretivo de solo.

Em levantamento feito pelo Instituto Aço Brasil, no ano de 2015, foram produzidas 33,3 milhões de toneladas de aço bruto; e a geração específica de subprodutos e resíduos foi de 594 kg / tonelada de aço bruto. Ou seja, em 2015, foram geradas, aproximadamente 19,8 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos (IABR, 2016).

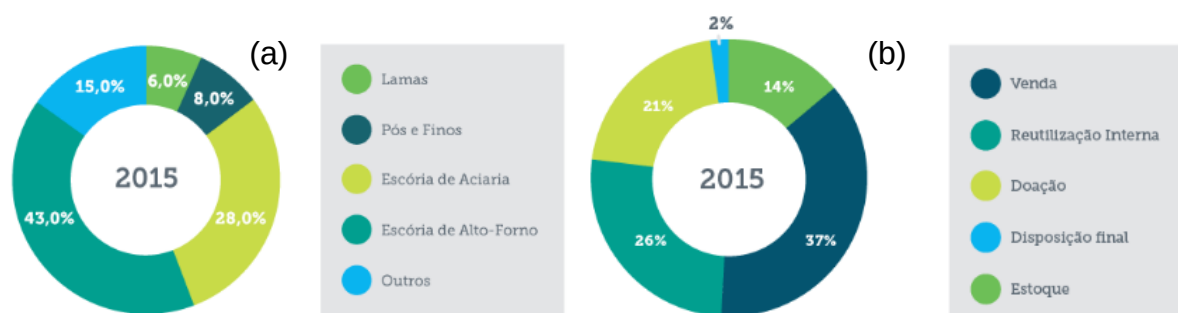


Figura 2: (a) Geração de coprodutos e resíduos por tipo; (b) Destinação das escórias de aciaria e outras escórias (IABR, 2016).

Conforme é possível ver na Figura 2, acima, das quase 19,8 milhões de toneladas, 28% são EA, o que representa, aproximadamente 5,5 milhões de toneladas. Destas, 2% são destinadas para disposição final e 14% para estoque, o que, somado, resulta em 880 mil toneladas de EA inutilizadas (IABR, 2016). Essa quantidade considerável de EA parada demanda grandes área para armazenamento e polui o meio ambiente, além de ser um sério risco de contaminação de solos e cursos d'água.

2.3 Uso de Escória em Matrizes Cimentícias

Estudo realizado por Montgomery e Wang apud (GUMIERI, 2002), na Austrália, analisa o uso da EA, combinada com clínquer e Escória de Alto Forno (EAF) como matéria prima para fabricar cimento. Montgomery e Wang avaliam que a EAF pode absorver o CaO livre presente na EA, reduzindo a instabilidade volumétrica da mesma. Os resultados obtidos no experimento mostraram que a resistência do cimento composto por EA e EAF é similar à do cimento Portland comum, quando a quantidade de EA aplicada não ultrapassa 35% e a quantidade de clínquer utilizado corresponde a, no mínimo, 55% da massa total.

Marino (2016) analisou as propriedades de agregados graúdos e miúdos feitos com EA. Analisando as inclusões metálicas, Marino (2016) obteve agregados graúdos com teor de metálicos de 1,33% e agregados miúdos com teor de 3,0%, sendo que, segundo Souza (2015), o limite recomendado é de 2,5%. A partir da análise granulométrica, Marino (2016) observou que a EA utilizada, tanto para agregado graúdo quanto para miúdo, estava dentro da zona ótima e com pouca variação em

relação aos agregados naturais (areia fina para agregado miúdo e brita 0 para agregado graúdo). O autor também analisou a presença de materiais pulverulentos, concluindo que os agregados graúdos de EA, com 0,10% de material pulverulento, apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211/2009 (valor máximo aceitável de 3 a 5% para agregados miúdos e 1% para graúdos) e os agregados miúdos de EA, com 5,70% de materiais pulverulentos, apresentaram valores um pouco acima desse limite. Com os dados obtidos nesses estudos, é possível afirmar que a EA pode ser utilizada tanto para agregado graúdo quanto para agregado miúdo, atendendo aos limites previstos na norma brasileira.

Silva (2011) estudou a utilização de EA como agregado para produzir elementos de concreto para pavimentação. Com relação aos elementos de concreto produzidos com agregados de EA, ele atestou, através de experimentos, que: a absorção de água dos elementos alcançaram valores inferiores aos dos elementos convencionais; o índice de vazios alcançaram valores inferiores aos dos elementos convencionais, o que induz a maior durabilidade; os elementos com agregado de EA não apresentaram expansão significativa; a resistência à compressão simples após 56 dias apresentaram valores próximos aos dos elementos convencionais; e a resistência à flexão dos elementos com agregado de EA apresentou valores superiores aos elementos convencionais.

Januzzi (2014) avaliou o uso de EA na produção de blocos estruturais pré-moldados. Através dos ensaios realizados, foi observado que os blocos produzidos com EA apresentaram comportamento mecânico satisfatório, em relação à utilização como alvenaria estrutural, com boa resistência à compressão. Entretanto, os blocos apresentaram baixa deformabilidade, o que levou a uma ruptura repentina das amostras e à queda da resistência à compressão, quando foi adotada uma argamassa pouco deformável, feita com EA.

Além disso, Maslehuddin et al. (2003) realizaram testes com agregados de EA, comparando os resultados obtidos com os de agregados naturais (brita de calcário). Os resultados obtidos demonstraram que algumas propriedades físicas do concreto com agregado de EA e sua durabilidade foram até superiores, quando comparados com o concreto com agregado natural. Na pesquisa foi destacado, inclusive, a

possibilidade de utilização dos agregados de EA para fabricação de estruturas em regiões com pouca disponibilidade de agregados naturais.

Ao se utilizar a EA, é importante se atentar à origem da mesma, bem como às variáveis envolvidas no seu processamento, como: o tipo de aciaria utilizada, o controle no processo de fabricação do aço, os procedimentos de processamento da escória após o resfriamento e sua estocagem, já que os mesmos interferem nas propriedades químicas, físicas e mineralógicas das escórias. Isso faz com que sejam obtidas variações consideráveis nas suas propriedades (SOUZA, 2007).

Assim, as propriedades físicas das escórias, como granulometria, densidade, massa específica e massa unitária, variam de acordo com a maneira como são resfriadas, podendo existir grandes variações nas suas composições, mesmo sendo produzidas numa mesma siderúrgica. Se a escória é resfriada naturalmente ao ar, os óxidos que a compõe cristalizam, perdendo as características hidráulicas. Com isso, a escória pode ser considerada inerte (GEYER, 2001). A Figura 3 mostra este material.



Figura 3: Aspecto da Escória de Aciaria bruta

(<https://blogreciclos.wordpress.com/2016/10/03/beneficiamento-da-escoria-de-aciaria/>).

2.3.1 Beneficiamento da Escória de Aciaria

Como a escória possui considerável expansibilidade volumétrica, a mesma necessita de um tratamento especial para redução da expansão. Essa expansão volumétrica provoca desintegração dos agregados da escória e, conseqüentemente, perda de

resistência (SOUZA, 2007). De acordo com Motz (2000) apud (SOUZA, 2007), ao utilizar-se EA na construção civil é muito importante se atentar ao teor de CaO e MgO livres presente no material, pois eles são fundamentais para a sua manutenção volumétrica. Portanto, quanto maior esse teor, maior será a instabilidade volumétrica da escória. Essa instabilidade se deve pela hidratação desses óxidos. O MgO sofre uma hidratação lenta, podendo levar até anos para causar mudanças de volume, enquanto o CaO hidrata-se de forma rápida, levando semanas para se desenvolver.

EAs que possuem elevado teor de CaO livre sofrem com um fenômeno chamado de formação da tufa, onde o CaO, quando em contato com água, transforma-se em Ca(OH)_2 e, posteriormente, em CaCO_3 (SOUZA, 2007). Fatores como reatividade da escória com água, porosidade superficial das partículas, quantidade da água à qual as partículas de escória estão expostas, a área superficial das partículas da mesma, o teor de CO_2 na atmosfera e aumento da temperatura, podem acelerar a formação da tufa (SOUZA, 2007).

Para reduzir a ocorrência dessa expansão, pode-se fazer uma pré-hidratação do material, denominada cura, que pode ser realizada a céu aberto, submetendo o material ao contato com a água. Este processo tem duração média de três meses a um ano, dependendo da composição química da escória (MACHADO e JOHN, 2000).

Outro processo de tratamento desenvolvido em conjunto pela Thyssen Krupp Stahl AG e Forschungsgemeinschaft Eisenhuettenschlacken e.V. foi informado por Kuehn et al. (2000) apud (SOUZA, 2007). Esse processo consiste em levar a escória fundida, proveniente do forno, para uma estação própria e injetar areia quartzosa e oxigênio no material, o que provoca a oxidação exotérmica do ferro metálico e do ferro divalente (SOUZA, 2007). Esse fenômeno libera energia suficiente para dissolver grandes quantidades de silício sem que a temperatura caia, o que faz com que a viscosidade da escória diminua drasticamente, alterando as condições cinéticas e possibilitando a dissolução do CaO livre (SOUZA, 2007).

Além da expansibilidade volumétrica da EA, é importante se atentar ao teor de metálicos presente no material. Os elementos metálicos, ricos em ferro (Fe), sofrem oxidação, gerando óxidos de ferro, que expandem e causam diversos problemas para a peça de concreto, como fissuração e deslocamento. Para reduzir o teor de

metálicos, as EA passam por um processo de recuperação dentro das próprias usinas (JANUZZI, 2014). Mesmo com esse processamento nas siderurgias, as EA ainda podem conter teor de metálicos indesejado. Para reduzi-lo, Marino (2016) realizou ensaio de teor de metálicos, seguindo o protocolo RECICLOS REC01/2011. Marino (2016) circulou a amostra de EA por um dispositivo de recuperação de metálicos, retirando e pesando a fração metálica retida no ímã. A circulação da EA foi repetida até que a fração metálica retida no ímã do dispositivo fosse inferior ao limite determinado por norma (MARINO, 2016).

2.4 Powder de Escória de Aciaria

Powders são adições superfinas, com granulometria igual ou inferior à do cimento Portland que, por sua vez, não deve passar de 100µm. Essas adições são feitas no concreto de cimento Portland ou no próprio cimento Portland, com o intuito de melhorar suas propriedades, além de carregarem consigo um benefício ambiental (GEYER, 2001). Essas adições podem possuir duas ações no concreto: ação pozolânica e a ação fíler (GEYER, 2001). Ação pozolânica é a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), através da reação química entre a sílica reativa (SiO_2), presente na adição, e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na matriz (GEYER, 2001). Já a ação fíler é, basicamente, física. Fíler é um material moído com granulometria fina, similar à do cimento Portland, geralmente inertes e que, devido às suas propriedades físicas, têm um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência de fissuração (GEYER, 2001).

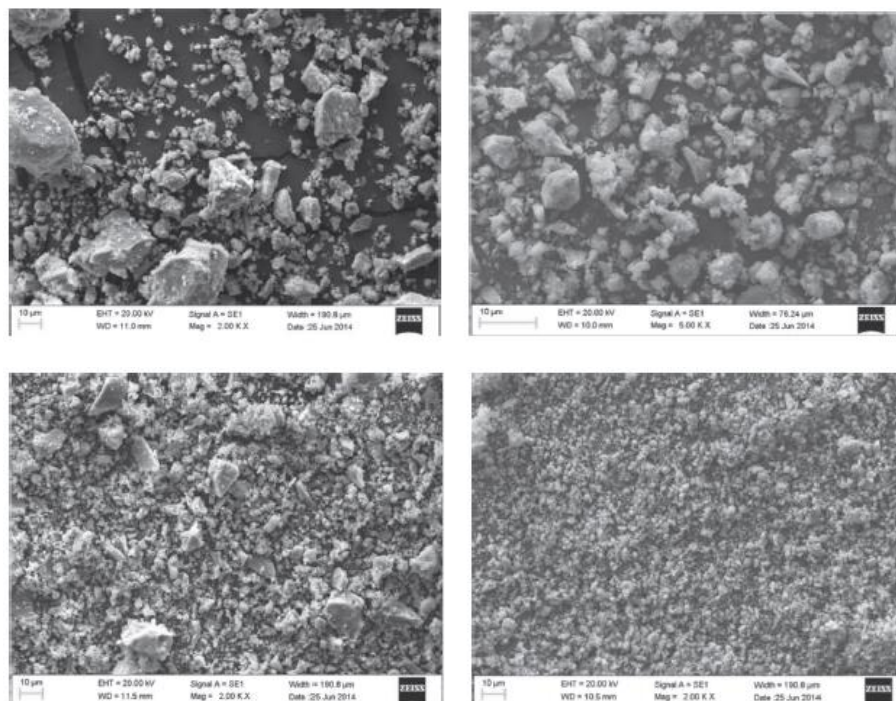


Figura 4: Micrografias SEM de quatro amostras de escória de aciaria, com diferentes tamanhos de partículas (SHI, CHEN, et al., 2015).

Existem diversos processos para se reduzir a escória a *powder*. Geyer (2001), utilizou, em seu experimento, um moinho de bolas (Figura 5) para moer a escória por um período mínimo de três horas, até que a mesma adquirisse granulometria semelhante à do cimento Portland, como pode ser observado na Figura 6.



Figura 5: Moinho de bolas utilizado na preparação do *powder* de escória de aciaria (ZHAO, WANG, et al., 2016).

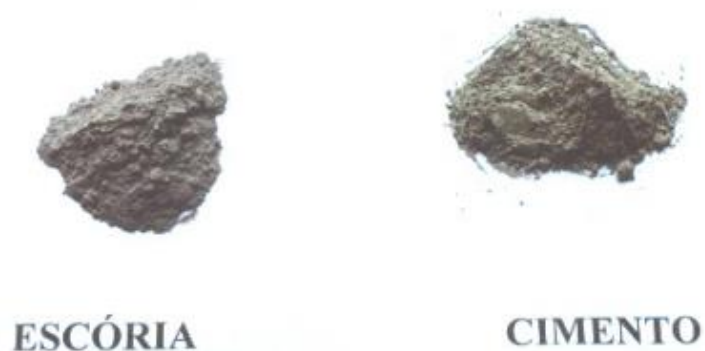


Figura 6: Aparência da escória de aciaria e do cimento Portland CP V-ARI (GEYER, 2001).

Já Shi et al. (2015), utilizaram um britador de mandíbula, triturador de rolo e um moinho de bolas, respectivamente, para transformar a EA bruta em pó. Para obter o *powder*, a partir dessa EA em pó, utilizaram um moinho a jato de vapor superaquecido, cujo sistema de moagem pode ser visto na Figura 7.

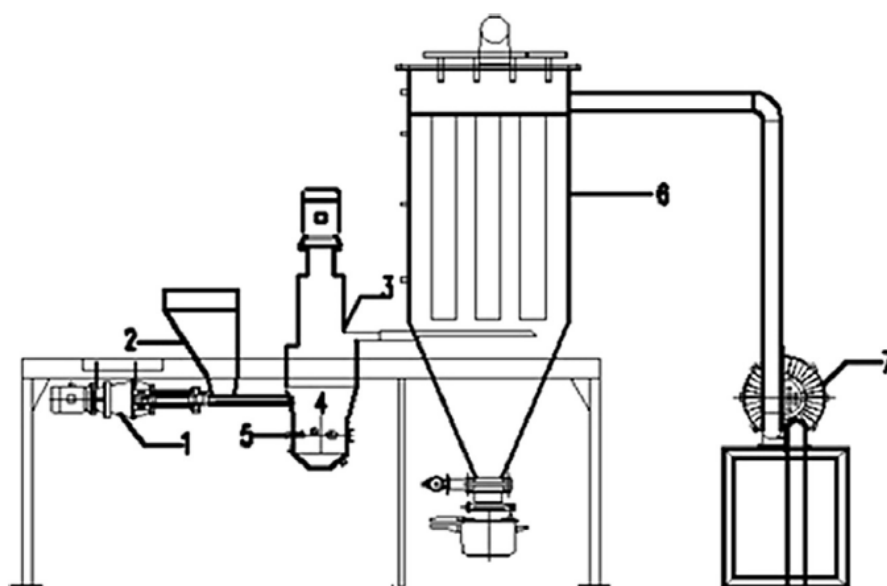


Figura 7: Sistema de moagem do moinho a jato de vapor superaquecido. (1) Alimentador de parafuso, (2) funil, (3) classificador, (4) câmara de esmagamento, (5) bocal Laval, (6) filtro de saco adequado para vapor superaquecido e (7) ventilador de ar induzido (SHI, CHEN, *et al.*, 2015).

No estudo de Roslan et al. (2015), a amostra foi preparada triturando e moendo a EA coletada, até suas partículas adquirirem finura de 45 μm . A Figura 8 mostra as formas da EA inicialmente, após ser triturada e, por fim, moída.

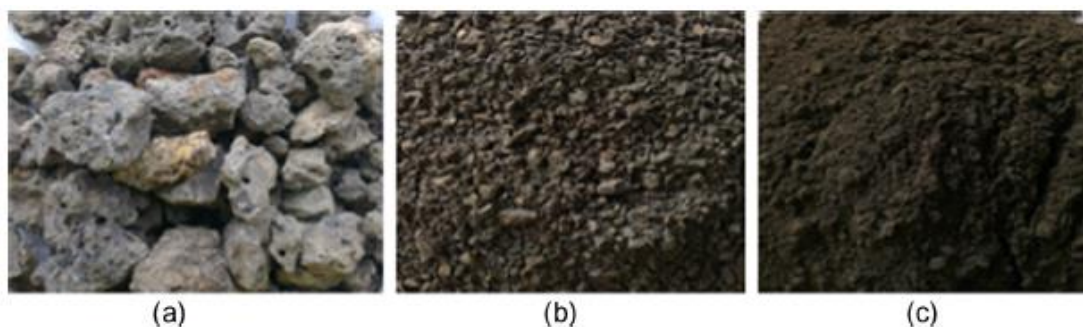


Figura 8: Escória de aciaria: (a) como recebida, (b) depois de triturada e (c) depois de moída (ROSLAN, ISMAIL, et al., 2015).

Quanto à área específica dos PEA, Wang et al. (2013) utilizaram duas amostras de PEA com finuras diferentes em seus experimentos, sendo uma com área específica de 442 m^2/kg e outra com área de 786 m^2/kg . Em outro estudo, Wang et al. (2012) utilizaram quatro amostras de EA com áreas específicas iguais a 458, 432, 441, 473 m^2/kg . Os resultados obtidos nos estudos de Wang et al. (2013), mostraram que o PEA mais fino possui maior atividade em idades iniciais e intermediárias. A pasta, argamassa e o concreto contendo PEA mais fino também demonstraram melhores valores de resistência à compressão, menor porosidade e permeabilidade e maior porcentagem de água não evaporável.

Para efeito de comparação, as normas brasileiras de cimento Portland de Alta Resistência Inicial, que possuem maior grau de exigência, limitam as partículas a no máximo 6% retidas na peneira de 75 μm e área específica maior ou igual a 300 m^2/kg (ABNT, 1991).

Com base nos estudos realizados, a massa específica das EA é mais elevada que a de outros materiais naturais, variando entre 3,0 e 3,6 g/cm^3 , enquanto a massa unitária varia de 1,6 a 1,7 kg/dm^3 e o índice de triturabilidade registrado foi de 0,7 (YI, XU, et al., 2012). A expansibilidade natural da EA pode chegar a até 10%, mas, se for devidamente processada, sua expansibilidade pode ser limitada a 0,33% - 0,43%

(YAN, WANG e MI, 2012). Também foi realçado que sua porosidade é mais elevada que a de outros materiais naturais.

Baseado nos trabalhos analisados, foi confeccionada a Tabela 1, que segue abaixo, contendo as variações das composições químicas das EA.

Tabela 1: Variações nas composições químicas das escórias de aciaria.

COMPOSIÇÕES	PORCENTAGEM NA EA (%)
CAO	28,6 – 46,5
FEO	22 – 40
SIO ₂	9,08 – 20
AL ₂ O ₃	1,44 – 20
MGO	5,4 – 10,15
MNO	1,59 – 6
S	0,1 – 0,12
P ₂ O ₅	0,81 – 1,93
CR ₂ O ₃	0 – 1,5
FE ₂ O ₃	3 – 36,19
SO ₃	0,18 – 0,74

Os principais componentes minerais da EA são o silicato tricálcico (C₃S), o silicato dicálcico (C₂S), fase RO (solução sólida de CaO-FeO-MnO-MgO), alumínio ferroso tricálcico (C₄AF), olivina, mervinita, cálcio ferroso (C₂F) e CaO livre (YI, XU, *et al.*, 2012).

A presença de C₃S, C₂S, C₄AF e C₂F endossa as propriedades cimentícias da EA. Segundo Caijun Shi (2003), a reatividade da EA aumenta com a basicidade, contudo, a presença de cal livre também aumenta com o aumento da basicidade da EA.

2.4.1 Interação do *Powder* de Escória de Aciaria com Matriz Cimentícia

Um estudo publicado por Qiang et al. (2013) demonstra que, devido às características químicas do PEA, sua ativação inicial é consideravelmente mais lenta que a do cimento Portland e ela reduz a hidratação inicial do mesmo. Isso faz com que o concreto produzido com uma mistura dos dois tenha maiores tempos de início e fim

de pega e, conseqüentemente, menores valores iniciais de resistência mecânica, melhor trabalhabilidade por mais tempo e um controle mais eficaz do calor de hidratação, já que a mesma se dá mais lentamente.

O processo e os produtos da hidratação do PEA são similares aos do cimento Portland, porém, como a temperatura de formação da EA é 200° a 300°C mais alta do que a do cimento Portland, os minerais C₂S e C₃S formados possuem cristais maiores e mais compactos, o que reduz a velocidade de hidratação da EA, quando comparada ao cimento Portland (ZHUA, HAOA, *et al.*, 2013).

Em outro estudo, desenvolvido por Duda (1989), foi analisada a evolução da resistência e a distribuição das dimensões dos poros de argamassas de cimento Portland com PEA de aciaria a oxigênio e Escória de Alto Forno (EAF). Nele, foi mostrado que o hidróxido de sódio (NaOH) acelera a hidratação e ainda gera uma mudança na composição e morfologia da fase de hidratação do concreto com PEA. Xialo et al. (2014) analisaram os efeitos do PEA na trabalhabilidade e durabilidade do concreto comprovando que o uso do PEA combinada com EAF traz benefícios sinérgicos, quando se adiciona ativadores à mistura, sendo possível sua utilização no concreto.

2.4.2 Durabilidade

Qiang et al. (2013), verifica a influência da EA nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto, levando em consideração o fator água/ligante no mesmo, que variou entre 0,35 e 0,50. Nesse estudo é atestada a influência da quantidade de água utilizada na mistura do concreto, quando se utiliza EA como adição. Devido à reatividade da escória com água, a presença de água no concreto é prejudicial para sua durabilidade, quando o fator água/ligante é mais elevado, já que leva a uma redução da resistência à compressão e aumento na retração inicial e na porosidade, que leva ao aumento da permeabilidade e reduz a resistência a cloretos.

Dongxu et al. (1997) investigaram a ação do cimento de EA na argamassa, analisando a resistência em idades avançadas, ataque de sulfatos, carbonatação por água do mar e reação álcali-agregado. O estudo mostrou que a argamassa com cimento de EA possui boa resistência aos 28 dias, ligeira expansão e boa resistência a elementos

prejudiciais como sulfato, dióxido de carbono e água do mar, além de apresentar redução da reação álcali-agregado.

2.5 Concreto de Alto Desempenho

Os concretos de alto desempenho (CAD) têm diversas características que o diferenciam dos concretos comuns: atingem resistências mecânicas muito maiores, chegando até mesmo a superar a casa dos 100 MPa, apresentam melhor desempenho frente a meios potencialmente agressivos e, portanto, maior durabilidade (THOMAZ, 2016). Assim, a denominação de CAD inclui, além da resistência, outros parâmetros como trabalhabilidade, bombeabilidade e deformabilidade (ROHDEN, 2011).

Em geral, o CAD é aplicado em obras ou elementos que exijam elevada resistência mecânica do concreto e/ou seções mais reduzidas dos elementos estruturais. Exemplos incluem edifícios muito altos, pontes e viadutos, estruturas em ambientes agressivos, monotrilhos, obras hidráulicas, elementos pré-moldados, pisos industriais e silos (THOMAZ, 2016). De modo geral, é possível obter diversas vantagens com a utilização de CAD, tais como: baixas deformações (seja por retração, fluência ou deformação imediata), elevada resistência ao desgaste ou abrasão, baixa porosidade e, conseqüentemente, baixa permeabilidade, grande fluidez na moldagem, altas resistências nas primeiras idades, diminuição das dimensões dos elementos estruturais e conseqüente redução no volume de concreto e na superfície de formas, ausência de exsudação, diminuição das cargas nas fundações e boa aderência a concretos já endurecidos (BACCIN, 1998).

Apesar de ainda não existir um consenso na literatura técnica, em geral, são chamados de CAD os concretos com resistência acima de 40 MPa e características que lhes proporcionem boa durabilidade, como baixa porosidade, resistência à carbonatação e resistência a cloretos. Já Baccin (1998), define CAD como sendo o concreto com propriedades ou atributos que satisfazem a vários critérios de desempenho. Um exemplo de aplicação do CAD é o edifício Kuala Lumpur (Malásia, 1997) com altura de, aproximadamente, 450 m, no qual foi empregado concreto com resistência característica de 80 MPa. No Brasil, CAD foi utilizado no edifício E-Tower,

edifício comercial situado na cidade de São Paulo, com altura de 160 m, onde chegou a ser empregado concreto com resistência à compressão de 125 MPa em 5 pilares (THOMAZ, 2016).

O mercado brasileiro tem recorrido cada vez mais aos CADs, estando este, cada vez mais presente nos projetos de obras de grande porte (THOMAZ, 2016). A mais nova versão da norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto, passou a ser aplicável a estruturas a serem moldadas com concretos com resistência de até 90 MPa (a versão antiga da norma chegava somente a 50 MPa) (THOMAZ, 2016).

Os materiais constituintes do CAD são, a princípio, os mesmos empregados nos concretos convencionais. Contudo, com o objetivo de se obter concretos com resistência mais elevada, faz-se necessário a redução brusca da relação água/cimento, o que torna indispensável a utilização de aditivos. Além disso, quando pretende-se obter concreto com resistência muito elevada, acima de 80 MPa, é necessário o emprego de adições minerais, sendo mais frequente o uso da sílica ativa (BACCIN, 1998). Tendo isso em vista, um dos processos mais utilizados para a obtenção de CAD é o emprego de cimento Portland comum, adição de sílica ativa (8 a 10% do peso de cimento) e superplastificantes (5 a 20 litros / m³), dimensão máxima dos agregados graúdos entre 10 e 12 mm e agregados miúdos com módulos de finura entre 2,7 e 3,2, afim de se obter uma relação água / cimento+adições mais baixa (variando entre 0,25 e 0,3) (BACCIN, 1998).

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do presente trabalho, foram avaliados 15 artigos e publicações que estudaram o comportamento do concreto contendo PEA em sua mistura como substituto parcial do cimento Portland ou como adição, conforme descritos na Tabela 2.

Foram selecionados os resultados mais importantes → a viabilidade técnica do PEA foi avaliada.

Tabela 2: Artigos utilizados para avaliar a utilização do *powder* de escória de aciaria.

TÍTULO	AUTOR (ES)	REVISTA	ANO
A Comparison of Early Hydration Properties of Cement–Steel Slag Binder and Cement–Limestone Powder Binder	Peiyu Yan, Guidong Mi e Qiang Wang	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	2013
Cementitious Properties of Super-Fine Steel Slag	Qiang Wang, Jianwei Yang, Peiyu Yan	Powder Technology	2013
Effect of Blended Steel Slag–GBFS Mineral Admixture on Hydration and Strength of Cement	Qiang Wang, Peiyu Yan, Guidong Mi	Construction and Building Materials	2012
Effects of Steel Slag Powder on Workability and Durability of Concrete	Guo Xiaolu, Shi Huisheng, Wu Kai	Journal of Wuhan University of Technology-Mater	2014
Influence of Steel Slag on Mechanical Properties and Durability of Concrete	Wang Qiang, Yan Peiyu, Yang Jianwei, Zhang Bo	Construction and Building Materials	2013
Performance of Steel Slag and Steel Sludge in Concrete	Nurul Hidayah Roslan, Mohammad Ismail, Zaiton Abdul-Majid, Seyedmojtaba Ghoreishiamiri, Bala Muhammad	Construction and Building Materials	2016
Preliminary Investigation on the Pozzolanic Activity of Superfine Steel Slag	Yan Shi, Haiyan Chen, Jia Wang, Qiming Feng	Construction and Building Materials	2015

Recycling of Industrial Waste and Performance of Steel Slag Green Concrete	Li Yun-feng, Yao Yan, Wang Ling	J. Cent. South Univ. Technol.	2009
Self-Cementitious Property of Steel Slag Powder Blended With Gypsum	Jihui Zhao, Dongmin Wang, Peiyu Yan, Dawang Zhang, Hao Wang	Construction and Building Materials	2016
Utilization of Steel Slag Powder as a Combined Admixture with Ground Granulated Blast-Furnace Slag in Cement Based Materials	Xiaolu Guo, Huisheng Shi	Journal Of Materials In Civil Engineering	2013
Hydration Properties of Basic Oxygen Furnace Steel Slag	Wang Qiang, Yan Peiyu	Construction and Building Materials	2010
A Discussion on Improving Hydration Activity of Steel Slag by Altering its Mineral Compositions	Qiang Wang, Peiyu Yan, Jianwen Feng	Journal of Hazardous Materials	2011
Durability Study of Steel Slag Cement	Li Dongxue, Fu Xinhua, Wu Xuequan, Tang Mingshu	Cement and Concrete Research	1997
Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria Como Adição ao Concreto	Rejane Maria Tubino Geyer	Tese de Doutorado	2001
An Overview of Utilization of Steel Slag	Huang Yi, Guoping Xu, Huigao Cheng, Junshi Wang, Yinfeng Wan, Hui Chen	Procedia Environmental Sciences	2012

4 RESULTADOS

4.1 Metodologia dos artigos estudados

No estudo desenvolvido por Yan et al. (2013), foram analisadas quatro amostras de aglomerante, pasta e argamassa, contendo mistura de cimento Portland e PEA nas proporções de: 100% de cimento Portland, 85% de cimento Portland e 15% de PEA, 70% de cimento Portland e 30% de PEA e 55% de cimento Portland e 45% de PEA. Utilizando amostras com relações água/ligante de 0,4 e aglomerante/areia de 1:3 e

duas temperaturas diferentes de cura, 25° e 50°C, mediram as taxas exotérmicas (em J/g.h) durante as primeiras 72 horas de hidratação, os diâmetros e volumes de poros nas pastas e as resistências à compressão após 3 dias de cura.

Já Wang et al. (2013) analisaram as propriedades cimentícias do PEA, através do conteúdo de água não evaporada em pasta contendo PEA; resistências de pastas, argamassas e concretos com diferentes teores de PEA e porosidade e permeabilidade do concreto contendo PEA.

Wang et al. (2012) fez o estudo do emprego de mistura de PEA com EAF como adição mineral ao concreto convencional, analisando a resistência à compressão, a porosidade, o calor de hidratação e a fluidez do concreto confeccionado com diferentes concentrações de PEA e EAF. No experimento, foram utilizados EAF e quatro tipos de PEA com composições químicas e área superficiais diferentes expostos na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3: Composição química e área superficial das amostras de PEA (EA) e de EAF utilizadas no experimento (WANG, YAN e MI, 2012).

COMPOSIÇÕES	PEA A	PEA B	PEA C	PEA D	EAF
SIO₂ (%)	10 - 15	15,96	17,3	13,62	31,76
AL₂O₃ (%)	1 - 5	4,24	6,29	3,39	14,84
FEO (%)	6 - 20	-	-	-	-
FE₂O₃ (%)	3 - 9	36,19	20,1	24,66	0,6
CAO (%)	45 - 60	34,28	40,95	41,87	36,44
MGO (%)	3 - 13	2,67	6,57	7,11	9,08
SO₃ (%)	-	0,67	0,74	0,38	1,94
NA₂O_{EQ} (%)	-	0,14	0,15	0,13	0,56
P₂O₅ (%)	1 - 4	1,09	1,67	1,93	0,02
MNO (%)	-	2,87	3,97	3,7	0,5
Área Superficial (M²/KG)	458	432	441	473	409

Xiaolu et al. (2014) também estudaram os efeitos de mistura combinada de PEA e EAF, como adição ao concreto convencional, analisando a performance do mesmo. Realizaram vários testes para averiguar aspectos como fluidez, trabalhabilidade,

resistência à compressão, permeabilidade a cloretos e água, carbonatação acelerada, retração e resistência à abrasão, avaliando também os efeitos de ativadores, em proporções conforme Tabela 4, nas propriedades do concreto com PEA.

Tabela 4: Proporções das misturas de concreto. GGBFS é EAF, DR é resíduo de dessulfuração, SS é sulfato de sódio e DG é gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).

Amostra	Cimento	EAF	PEA	Mistura Combinada		Areia	Brita	Plastificante	Água
				Ativador	Teor				
				Tipo					
C1	306	72	0	-		788	1004	5.67	192
C2	306	50.4	21.6	-		788	1004	5.67	192
C3	306	50.4	21.6	DR	1.44	788	1004	5.67	192
C4	306	50.4	21.6	SS	2.16	788	1004	5.67	192
C5	306	50.4	21.6	DG	2.88	788	1004	5.67	192

Massa por metro cúbico (kg/m³)

Qiang et al. (2013) avaliaram a influência do PEA nas propriedades de concretos feitos com resistências, aos 28 dias, de 47MPa e 73 MPa, com relação água/ligante constante, afim de revelar a relação entre a substituição parcial de cimento Portland por PEA e a variação das propriedades do concreto. Além disso, analisaram amostras de concreto com diferentes proporções de PEA, com mesma resistência à compressão aos 28 dias, estudando comparativamente as suas propriedades. Resistência à compressão, retração, permeabilidade a cloretos e profundidade de carbonatação foram testados.

Roslan et al. (2015) realizaram pesquisa sobre a atividade pozolânica do PEA, bem como características do concreto produzido com sua adição, como resistência à compressão, à ruptura e à flexão e o módulo de elasticidade, em misturas de concreto cuja resistência esperada aos 28 dias era de 35MPa.1

No artigo de Shi et al. (2015), foi preparado PEA com partículas de diferentes tamanhos, a partir de um moinho a jato de vapor superaquecido. O cimento utilizado foi o CEM I 42,5R, cuja resistência de referência, aos 28 dias, varia entre 42,5MPa e 62,5MPa. A atividade pozolânica do PEA no concreto, com diferentes proporções, foi investigada, além da microestrutura das amostras de PEA e das pastas de cimento

Portland contendo o PEA. A necessidade de água para consistência normal, o tempo de pega e a solidez da pasta foram verificadas.

Yun-Feng et al. (2009), investigaram as propriedades do concreto feito com cimento Portland 42,5R e adições de PEA e EAF, conferindo a trabalhabilidade, a resistência à compressão e à flexão, bem como a efetividade dos PEA e EAF para inibir as reações álcali-agregado. Amostras de concreto foram preparadas contendo cimento Portland puro, 10, 20, 30 e 40% de PEA, 30% de EAF, 10% de PEA com 20% de EAF, 15% de PEA com 15% de EAF e 20% de PEA com 10% de EAF.

Zhao et al. (2016) realizaram experimentos utilizando pastas e argamassas contendo PEA puro, mistura de 95% de PEA com 5% de gesso em pó e mistura de 95% de cimento Portland e 5% de gesso em pó. Foram medidos tanto a evolução do calor de hidratação das pastas, quanto o calor de hidratação acumulado, bem como o teor de água não evaporável e de Ca(OH)_2 . Também foram determinadas as morfologias dos produtos da hidratação e corpos de prova de pasta e argamassa de cimento Portland + gesso e PEA + gesso foram submetidos a testes para averiguar as resistências à compressão e à tração de ambos.

Zhu et al (2009) avaliaram as propriedades cimentícias do PEA e trabalharam com mistura de PEA e EAF, afim de atestar o que seria melhor tendo em vista a resistência e durabilidade do concreto. Foi analisada também a influência da alcalinidade nas propriedades cimentícias do PEA.

No estudo realizado por Guo et al. (2013), também foi avaliada a viabilidade do emprego de PEA combinada com EAF como mistura mineral para materiais cimentícios (pasta, argamassa e concreto). Os efeitos do PEA no requisito de água para consistência normal, nos tempos de pega, na resistência à compressão e nos produtos da hidratação da pasta/argamassa de cimento Portland.

Qiang et al. (2010), estudaram as propriedades da hidratação do PEA. Foram utilizadas duas amostras de pasta, uma contendo PEA misturada com água e outro contendo PEA misturada com solução de hidróxido de sódio, a partir das quais retiraram dados para analisara o calor de hidratação, a porcentagem de água não evaporável e os produtos da hidratação.

Baseado na relação entre as fases minerais e as propriedades cimentícias, Wang et al. (2011) propuseram dois esquemas para elevar a atividade do PEA: Um foi peneirar a amostra de PEA, utilizando a parte composta por partículas finas (passante na peneira) como adição mineral e a parte composta por partículas mais graúdas (retida na peneira) como agregado miúdo. O segundo esquema foi o de reconstruir o PEA, adicionando agentes reguladores para aumentar a relação entre fase cimentícia e fase inerte, afim de aumentar as propriedades cimentícias do PEA. Nesse processo de reconstrução, o agente regulador precisou ser selecionado para adaptar-se ao PEA específica e a alcalinidade precisou ser aumentada o máximo possível (WANG, YANA e FENG, 2010).

Dongxue et al. (1997) realizaram testes utilizando um cimento com PEA feito com clínquer de alta qualidade e PEA com maior finura de moagem e adições especiais, analisando as propriedades desse cimento. As propriedades analisadas foram a resistência química, resistência à carbonatação, a habilidade de reduzir a reação álcali-agregado e a estrutura porosa.

Geyer (2001), afim de averiguar a potencialidade do uso de PEA como adição ao concreto, analisou a pozolanicidade, a resistência à compressão, a expansibilidade e a profundidade de carbonatação de amostras de concreto feitas com adição de PEA e também avaliou a corrosão de armaduras em vigas de concreto armado com PEA.

Por fim, Yi et al. (2012) fizeram uma extensa revisão das utilizações de PEA em matrizes cimentícias. Entre elas, Luo et al (apud Yi et al. (2012)), experimentaram os efeitos de aceleradores na resistência inicial de materiais cimentícios com PEA.

4.2 Efeitos do *Powder* de EA Sobre o Estado Fresco do Concreto

4.2.1 Calor de Hidratação

Yan et al. (2013) avaliaram o calor de hidratação de pastas de cimento Portland puro, de cimento Portland com PEA e de cimento Portland com pó de calcário, a uma temperatura de cura de 25°C. Devido às propriedades químicas do PEA, a ativação dela se dá de forma mais lenta, o que reduz o calor produzido durante sua hidratação, como pode ser visto nos gráficos da Figura 9.

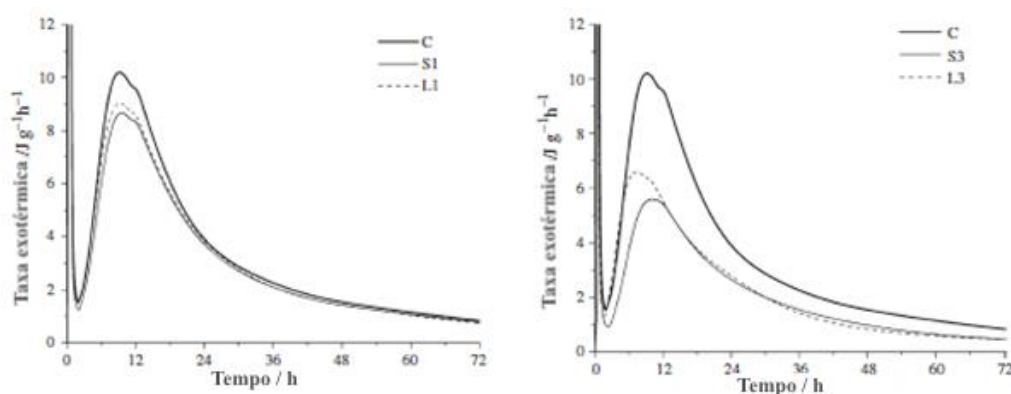


Figura 9: Calor de hidratação, com temperatura de cura de 25°C, para amostras de pasta com: (C) cimento Portland puro, (S1) 85% cimento Portland e 15% PEA, (L1) 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (S3) 55% cimento Portland e 45% PEA e (L3) 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).

Para comparação, foram feitas amostras, submetidas a um calor de cura de 50°C e os resultados podem ser vistos nos gráficos da Figura 10. É possível perceber que, com o aumento da temperatura de cura, o calor de hidratação da pasta contendo PEA praticamente se iguala ao da pasta contendo pó de calcário, mas ainda são bastante inferiores ao da pasta de cimento Portland puro (YAN, MI e WANG, 2013).

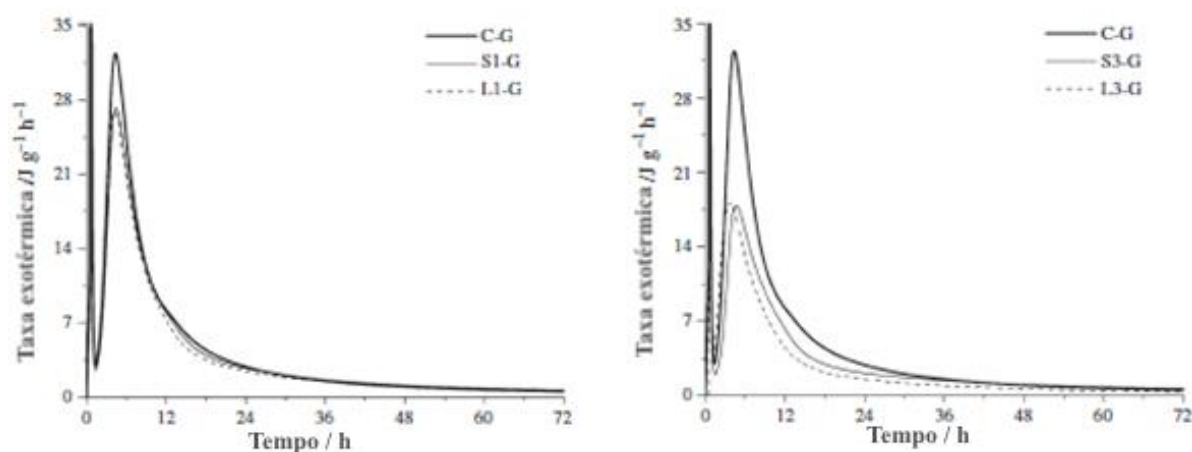


Figura 10: Calor de hidratação, com temperatura de cura de 50°C, para amostras de pasta com: (C-G) cimento Portland puro, (S1-G) 85% cimento Portland e 15% PEA, (L1-G) 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (S3-G) 55% cimento Portland e 45% PEA e (L3-G) 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).

Qiang et al. (2010) investigaram a influência do tamanho das partículas do PEA no processo de hidratação da pasta contendo o material, com relação água/PEA de 0,3. Foram utilizadas duas amostras com PEA de diferentes áreas superficiais, a mais grossa com $458 \text{ m}^2/\text{kg}$ (CS) e a mais fina com $506 \text{ m}^2/\text{kg}$ (FS). Como pode ser verificado no gráfico da Figura 11, a amostra FS possui maior calor de hidratação, o que significa que o processo ocorre mais rapidamente.

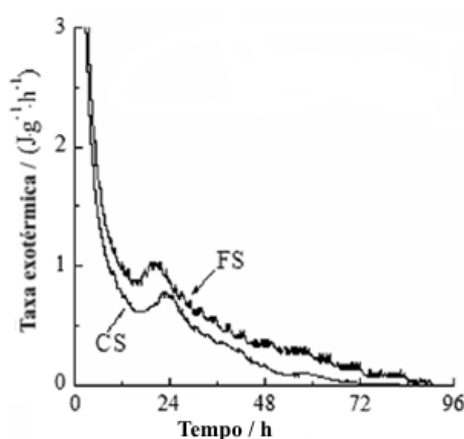


Figura 11: Evolução do calor durante a hidratação do (CS) PEA mais grosso e (FS) PEA mais fino (QIANG e PEIYU, 2010).

Além disso, foi analisada a influência do pH na hidratação do PEA. O PEA mais grosso foi escolhido como amostra de referência e foi misturada em solução de NaOH, com valor de pH de 13,0 e relação solução/PEA de 0,3. Foi obtido o gráfico exibido na Figura 12 (QIANG e PEIYU, 2010).

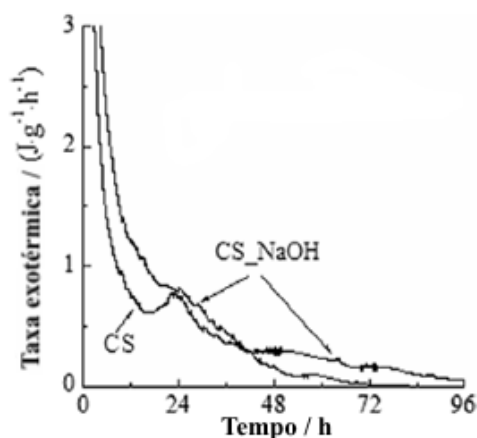


Figura 12: Evolução do calor durante a hidratação da PEA sob condição de pH diferente (CS_NaOH) (QIANG e PEIYU, 2010).

É possível observar com o uso do PEA leva à redução do calor de hidratação de matrizes cimentícias. Como mencionado por Yan et al. (2013), essa redução se dá pelo retardamento das reações químicas de hidratação. Porém, em temperaturas mais elevadas e em meios com o PH mais alto, há uma diminuição do retardamento. Essa queda no calor de hidratação é benéfica às matrizes, pois o calor mais disperso ao longo do tempo evita fissuração por solicitações térmicas. Entretanto, pode indicar menor resistência nas idades iniciais.

4.2.2 Trabalhabilidade

Já Wang et al. (2012), investigaram a fluidez das argamassas produzidas com PEA e EAF e relações aglomerante/areia de 1:3 e água/ligante de 0,50, através do Slump Test. Fluidez elevada, geralmente, é necessária para o concreto porque, atualmente, uma das maneiras mais usuais de aplicação do concreto é através do seu bombeamento. Pela Figura 13, é possível verificar que os PEA possuem melhor atuação na fluidez que o cimento Portland e a EAF e, mais especificamente, o PEA B é a mais benéfica, nesse ponto de vista.

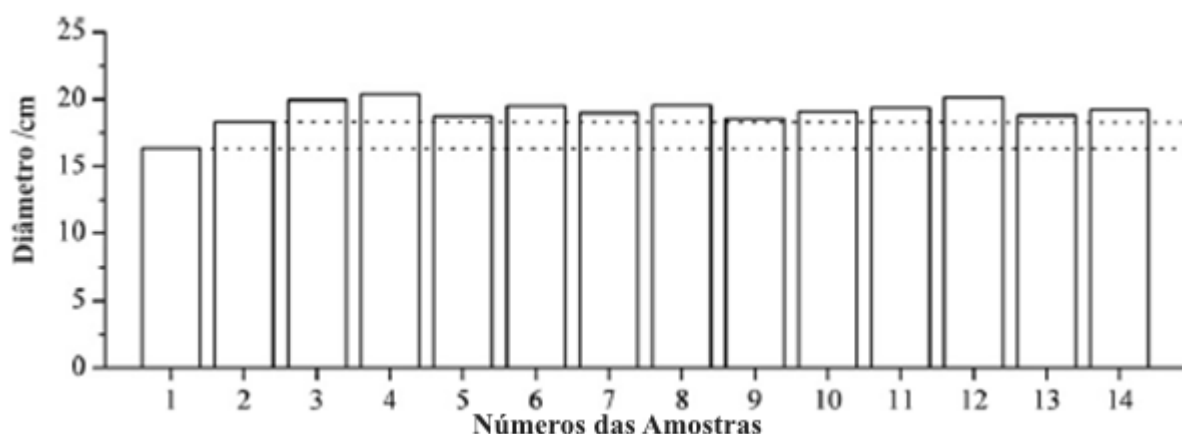


Figura 13: Fluidez de diferentes misturas de argamassa. Amostras: (1) Cimento Portland puro; (2) 50%cimento Portland + 50%EAF; (3) 50%cimento Portland + 50%PEA A; **(4) 50%cimento Portland + 50%PEA B**; (5) 50%cimento Portland + 50%PEA C; (6) 50%cimento Portland + 50%PEA D; (7) 50%cimento Portland + 15%PEA A + 35%EAF; **(8) 50%cimento Portland + 15%PEA B + 35%EAF**; (9) 50%cimento Portland + 15%PEA C + 35%EAF; (10) 50%cimento Portland + 15%PEA D + 35%EAF; (11) 50%cimento Portland + 25%PEA A + 25%EAF; **(12) 50%cimento Portland + 25%EA B + 25% EAF**; (13) 50%cimento Portland +

25%PEA C + 25%EAF; (14) 50%cimento Portland + 25%PEA D + 25%EAF (WANG, YAN e MI, 2012).

Pelo estudo desenvolvido por Wang et al. (2012), é possível constatar que o PEA aumenta a fluidez do concreto, o que é positivo, quando o concreto é utilizado em obras onde seja necessário fazer seu lançamento ou bombeamento do mesmo.

4.2.3 Tempo de Pega

Xiaolu et al. (2014) analisaram os tempos de início e fim de pega das amostras, cujos resultados estão exibidos no gráfico da Figura 14. Como já era de se esperar, por serem pouco reativos, a EAF e o PEA precisam de mais tempo para reagirem e, consequentemente, dar início à pega, efeito que pode ser amenizado pela adição dos ativadores, principalmente o sulfato de sódio.

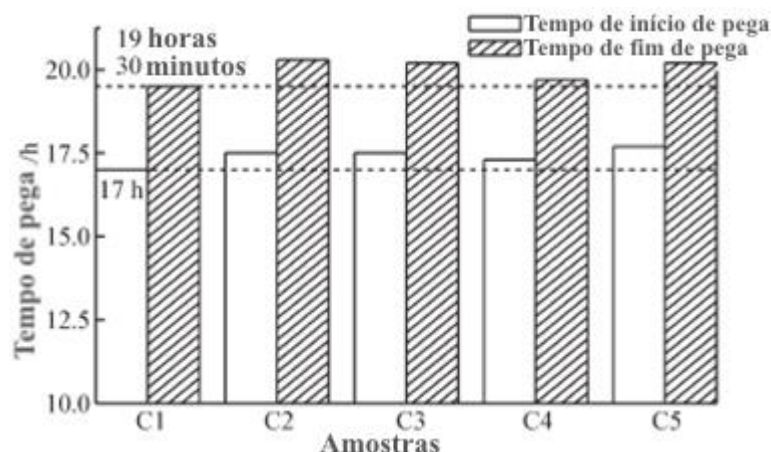


Figura 14: Tempos de início e fim de pega de concreto com EAF ou com mistura mineral de EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).

Seguindo, em partes, o mesmo raciocínio de Qiang et al. (2010), Shi et al. (2015) estudaram a necessidade de água para pasta de consistência normal, os tempos de pega e a solidez da pasta de cimento com PEA de diferentes granulometrias. Como mostrado na Tabela 7, é possível observar que a necessidade de água para pasta de

consistência normal aumenta com a redução do tamanho das partículas do PEA, o que pode ser explicado pelo fato de o decrescimento das partículas levar a um aumento da área superficial do PEA. Então, é preciso mais água para envolver as partículas do PEA. Além disso, a maioria das partículas do PEA que não são esféricas acumulam-se descompactas e, com o tamanho das partículas reduzido, existirão mais vazios entre elas, fazendo com que seja necessária maior quantidade de água para preencher tais vazios, logo, a necessidade de água para que a pasta mantenha a consistência normal aumenta. Na Tabela 5 também é possível ver o efeito do PEA com diferentes tamanhos de partículas nos tempos de pega da pasta de cimento. Os tempos de início de pega e final de pega aumentam com a redução do tamanho das partículas, que ocorre devido ao aumento da necessidade de água para pasta de consistência normal, o que é um fator importante no aumento do tempo de pega.

Tabela 5: Propriedades cimentícias do cimento com PEA (SHI, CHEN, et al., 2015)

Amostras	Tamanho part. $D_{50}/\mu\text{m}$	Taxa de subst. / %	Necessidade de água / ml	T. Início de pega / min	T. Fim de pega / min	Estab. Volum.
C	16.88	0	125	172	222	Qualificada
SS ₁	13.3	30	112	127	200	Qualificada
SS ₂	8.11	30	118	165	225	Qualificada
SS ₃	5.10	30	123	170	240	Qualificada
SS ₄	2.52	30	130	180	320	Qualificada

Com isso, é possível concluir que, por serem pouco reativos, os PEA atuam aumentando os tempos início e fim de pega, já que retardam as reações químicas de hidratação. Pelo estudo de Shi et al. (2015), também se observa que, quanto menor o tamanho dos grãos do PEA, maiores são os tempos de início e fim de pega, o que é positivo, quando se necessita de mais tempo para trabalhar o concreto e não há necessidade de grandes resistências iniciais. Para reduzir esses efeitos, é possível utilizar ativadores, como o sulfato de sódio que, como comprovado por Xiaolu et al. (2014), atua aumentando a reatividade do PEA.

4.3 Efeitos do *Powder* de EA Sobre o Estado Endurecido do Concreto

4.3.1 Porosidade e Permeabilidade

No experimento desenvolvido por Yan et al. (2013), é mostrado que, a temperatura de 25°C, a pasta contendo PEA possui poros maiores do que a pasta de cimento Portland puro, após 3 dias de cura, com relação água/ligante de 0,4. Essa diferença não é tão sentida quando o índice de substituição de cimento Portland por PEA é de 15%, mas

quando aumenta para 45%, fica bastante evidente a grande diferença entre os tamanhos dos poros das duas amostras, como pode ser visto nos gráficos da Figura 15. Isso pode ser devido ao fato de a estrutura de poros da pasta ficar mais densa com mais produtos de hidratação - como a hidratação do PEA é mais devagar do que a do cimento Portland, sua estrutura de poros fica menos densa. Contudo, quando a temperatura de cura é aumentada para 50°C, também com relação água/ligante 0,4, essa diferença de tamanho passa a ser menos sentida, mesmo que a pasta com PEA continue tendo poros maiores do que a pasta de cimento Portland puro, como é possível perceber nos dois gráficos da Figura 16.

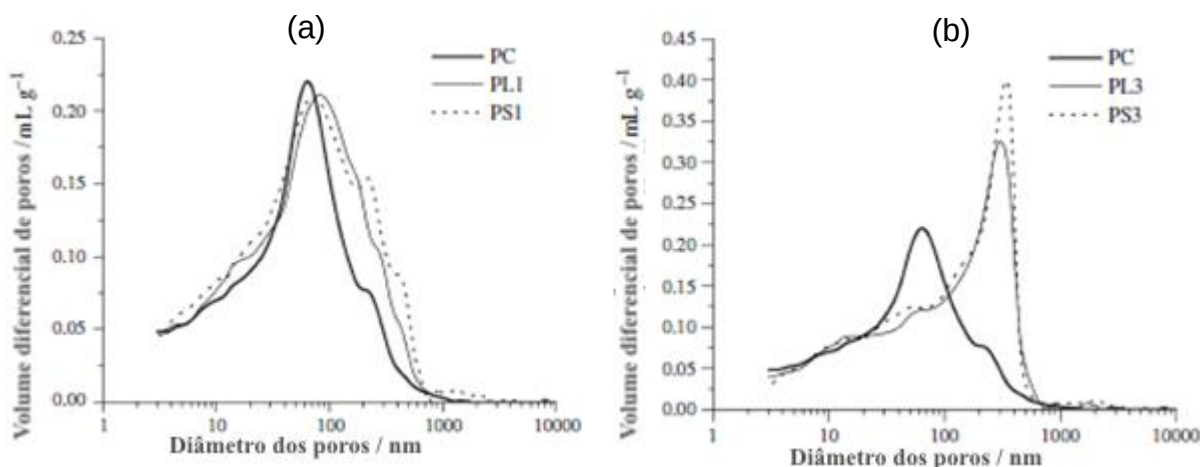


Figura 15: Distribuições dos tamanhos dos poros da pasta endurecida a 25°C.

Amostras: (PC) pasta de cimento Portland puro, (PS1) pasta com 85% cimento Portland e 15% PEA, (PL1) pasta com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (PS3) pasta com 55% cimento Portland e 45% PEA e (PL3) pasta com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).

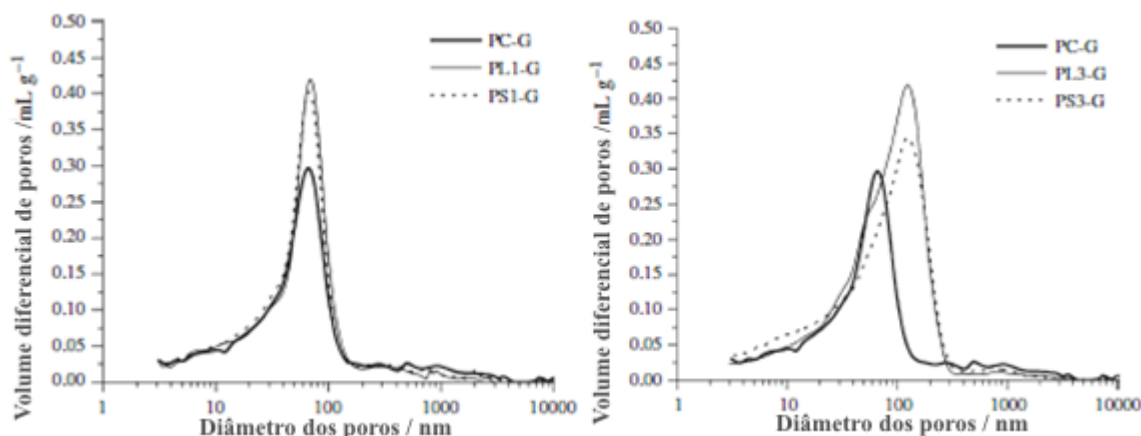


Figura 16: Distribuições dos tamanhos dos poros da pasta endurecida a 50°C. Amostras: (PC-G) pasta de cimento Portland puro, (PS1-G) pasta com 85% cimento Portland e 15% PEA, (PL1-G) pasta com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (PS3-G) pasta com 55% cimento Portland e 45% PEA e (PL3-G) pasta com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).

Wang et al. (2013) analisaram a porosidade do concreto contendo PEA com 90 e 720 dias, de acordo com gráfico da Figura 17. É nítido que, quanto maior a substituição de cimento Portland por PEA, maior será a porosidade do concreto, e que o PEA com partículas mais grosseiras produz concreto mais poroso do que a PEA com partículas mais finas. Em consequência dessa porosidade aumentada, o concreto torna-se mais permeável, tanto à água quanto a cloretos, como pode-se ver na Figura 18.

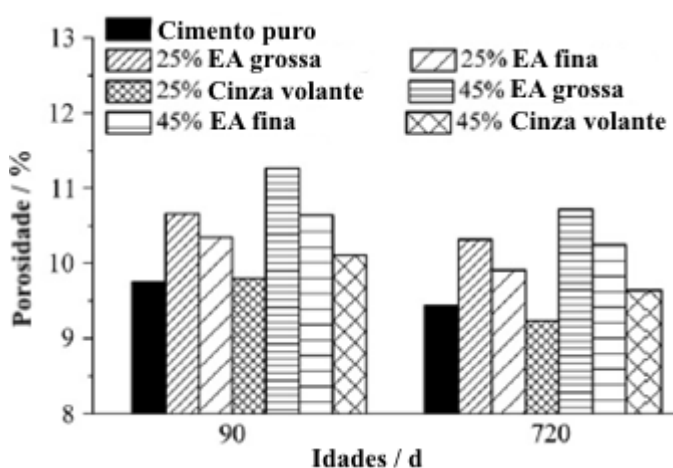


Figura 17: Porosidade do concreto (WANG, YANG e YAN, 2013)

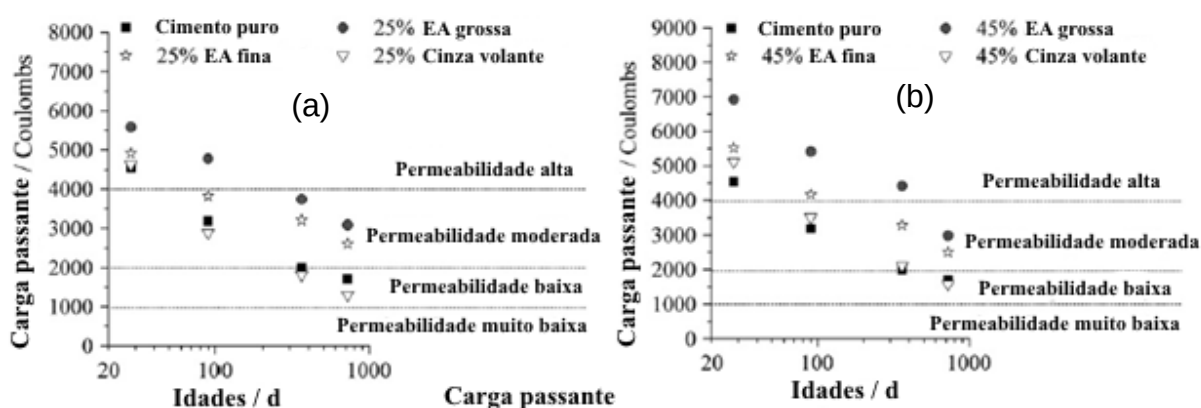


Figura 18: Influência da PEA na permeabilidade do concreto: (a) 25% de substituição e (b) 45% de substituição (WANG, YANG e YAN, 2013).

Wang et al. (2012) investigaram a porosidade da pasta contendo PEA em taxas de substituição de 22,5% e 45%, utilizando relação água/ligante de 0,42 e temperatura de cura de 20°C, aos 3 dias e 360 dias, e, assim como Wang et al. (2013) e Yan et al. (2013), encontraram poros maiores nos concretos contendo PEA, com diferença ainda maior quando a taxa de substituição foi de 45%.

Xiaolu et al. (2014) consideraram a resistência do concreto feito com mistura de PEA e EAF à permeação de cloretos e água e à carbonatação acelerada. Foi utilizado o método do fluxo elétrico de Coulomb para determinar a permeabilidade a cloretos e os resultados estão na Tabela 6, enquanto os resultados do teste de permeabilidade à água estão dispostos no gráfico da Figura 19. Pela tabela e pelo gráfico, é possível perceber que a amostra contendo apenas mistura EAF-PEA possui a maior permeabilidade a cloretos e água, mas que, com a adição de ativadores, seu rendimento melhora significativamente, principalmente com a utilização do gesso de dessulfuração. Isso se deve ao fato de que os efeitos dos ativadores nas reações hidráulicas latentes do PEA fizeram a microestrutura das amostras se compactarem, reduzindo os tamanhos dos poros. A microestrutura mais compacta e com poros menores bloqueou a penetração e difusão dos cloretos e da água.

Tabela 6: Fluxo elétrico de Coulomb do concreto com EAF ou com EAF-PEA.

Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUIHENG e KAI, 2014).

Amostra de concreto	C1	C2	C3	C4	C5
Fluxo elétrico de Coulomb (Coulomb)	2 062	2 135	1 892	1 201	1 550
Categorias	Qs -II	Qs -II	Qs- III	Qs- III	Qs- III

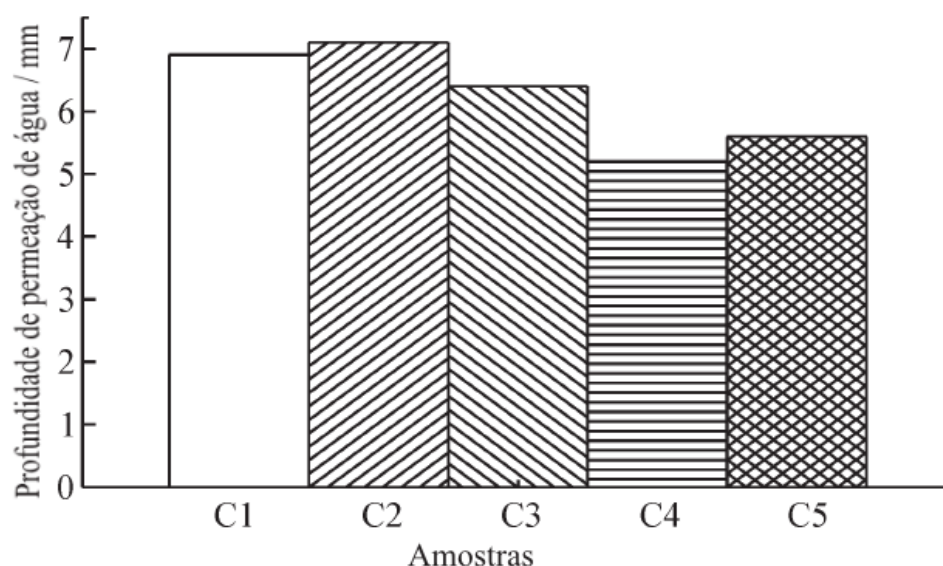


Figura 19: Profundidade de permeação de água no concreto com EAF ou com EAF-PEA (XIAOLU, HUI SHENG e KAI, 2014).

Qiang et al. (2013) mostram a influência da relação água/ligante na permeabilidade a cloretos. Como é notável pelos gráficos da Figura 20, com a relação água/ligante de 0,5, o efeito negativo do PEA no concreto é muito realçado, enquanto que, com a relação de 0,35, esse efeito é bastante mitigado, a tal ponto que a permeabilidade a cloretos após 400 dias é praticamente a mesma para o concreto de cimento Portland puro e para o concreto com 45% de PEA.

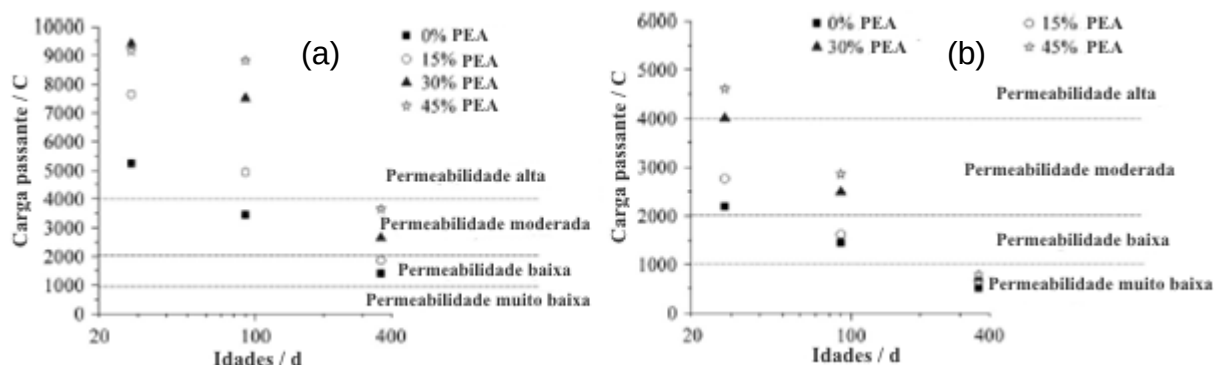


Figura 20: Permeabilidade a cloretos do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, et al., 2013).

Como comprovado pelos estudos analisados, o PEA possui efeito negativo na porosidade e consequente permeabilidade do concreto, o que leva à redução da durabilidade das peças feitas com esse material. Quanto maior a taxa de PEA utilizado na mistura, maiores são os diâmetros dos poros do concreto. Porém, como visto nas pesquisas avaliadas, o aumento na temperatura externa, a utilização de ativadores, principalmente o gesso de dessulfuração, e a redução da relação água/ligante, pode reduzir os efeitos negativos do PEA na porosidade e na permeabilidade.

4.3.2 Carbonatação

Além da permeação de cloretos e água, Xiaolu et al. (2014) analisaram a carbonatação acelerada, identificando que, novamente, o concreto apenas com EAF-PEA teve o pior desempenho, conforme gráfico da Figura 21. Entretanto, com a adição dos ativadores a profundidade de carbonatação diminuiu, sendo que o gesso de dessulfuração teve a maior influência positiva. Possivelmente, isso também se deve ao fato de os ativadores acelerarem a reação de hidratação do PEA, o que melhora o refinamento dos poros, reduzindo a difusão de CO_2 e, consequentemente, fazendo com que a carbonatação seja menos severa.

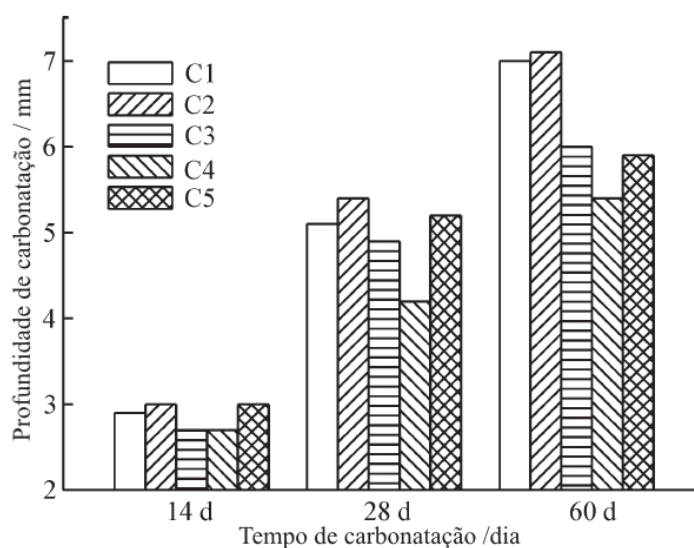


Figura 21: Profundidade de carbonatação no concreto com EAF ou com EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUISENG e KAI, 2014).

Qiang et al. (2013) também avaliaram a profundidade de carbonatação e mostram que, assim como na permeabilidade, a relação água/ligante é fundamental no desempenho do concreto, como mostra a Tabela 7, abaixo. Aos 28 dias, a profundidade de carbonatação no concreto é praticamente inexistente, mesmo com 45% de PEA.

Tabela 7: Profundidade de carbonatação do concreto com 28 dias (QIANG, PEIYU, et al., 2013).

Água / Ligante	0.50				0.35			
Percentual de PEA (%)	0	15	30	45	0	15	30	45
Profundidade de carbonatação	1.4 mm	1.3 mm	2.4 mm	7.3 mm	Quase zero	Quase zero	Quase zero	1.9 mm

Como a profundidade de carbonatação está diretamente ligada à permeabilidade, é possível concluir que o PEA também apresentará performance negativa nesse quesito. Para reduzir a profundidade de carbonatação, é necessário reduzir os diâmetros dos poros, o que pode ser alcançado através dos métodos apontados no item 4.2.1.

4.3.3 Retração

Qiang et al. (2013) estudaram a retração do concreto, também levando em consideração as relações água/ligante de 0,5 e 0,35. Pelos gráficos da Figura 22, nota-se que as retrações totais das quatro amostras, aos 90 dias, são muito parecidas, apesar de o concreto com cimento Portland puro possuir o menor valor dentre as quatro. Pode ser observado também que o concreto com grande volume de PEA tende a apresentar retrações mais rapidamente, com 40 dias, já que, quando exposto a ambientes secos, a perda de água do concreto com grande volume de PEA e relação água/ligante alta, é maior nas idades iniciais e intermediárias porque seu aglomerante hidrata muito mais divagar, o que, provavelmente, é um motivo para a retração se desenvolver tão rápido nesse período. Com a relação água/ligante de 0,35, as retrações das quatro amostras se desenvolvem de maneira muito similar, o que indica que, com relação de água/ligante menor, o PEA tem uma influência muito pequena no desenvolvimento da retração do concreto.

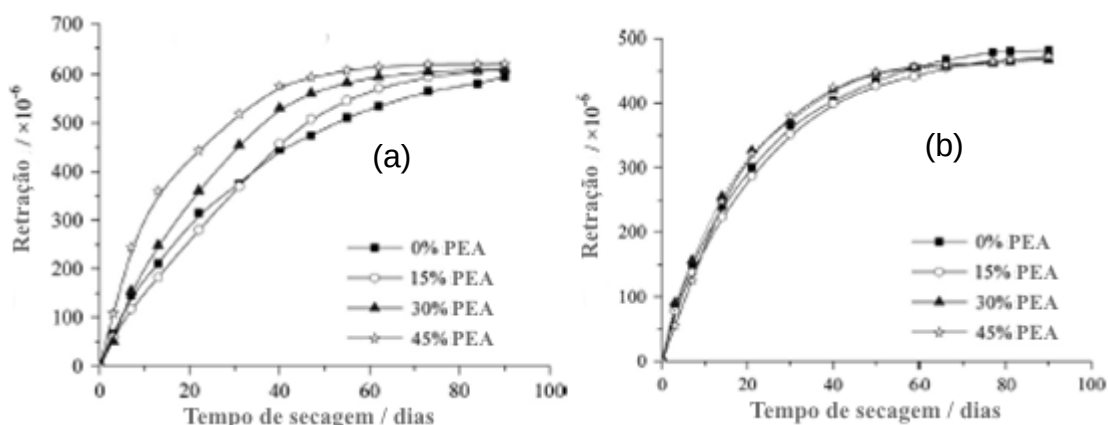


Figura 22: Retração do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, et al., 2013).

Xiaolu et al. (2014) também analisaram a retração do concreto, mas utilizando amostras de concreto com EAF e concretos com mistura de EAF-PEA. Os ensaios mostraram que os concretos com mistura EAF-PEA possuem melhor desempenho em relação à retração que o concreto apenas com EAF, sendo que, mais uma vez, o

concreto que possuía o ativador gesso de dessulfuração apresentou melhores valores.

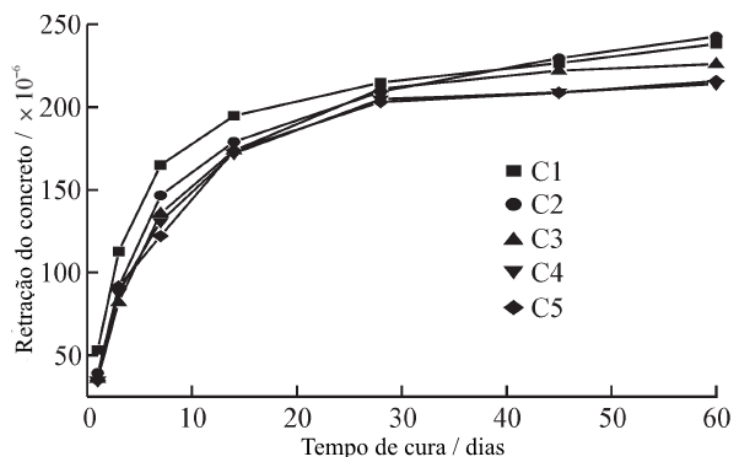


Figura 23: Retração do concreto contendo apenas EAF ou misturas EAF-PEA.

Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUI SHENG e KAI, 2014).

Observa-se que a baixa reatividade do PEA influenciou na retração do concreto. Conforme citado por Qiang et al. (2013), a perda de água do concreto com grande volume de PEA e relação água/ligante alta é maior nas idades iniciais e intermediárias porque, com o PEA, seu aglomerante hidrata muito mais devagar, o que, provavelmente, favorece a perda de água por evaporação e é um motivo para a retração se desenvolver tão rapidamente nesse período. Para reduzir esse efeito, é possível reduzir a quantidade de água na mistura, o que, consequentemente, reduz o volume de água evaporada, ou utilizar ativadores para acelerar a ativação do PEA e, consequentemente, o consumo da água presente na mistura.

4.3.4 Resistência Mecânica

As resistências à flexão e à compressão são dois fatores chave na avaliação das matrizes cimentícias. Shi et al. (2015) analisaram a resistência à flexão de argamassas contendo EA comum e PEA, comparando-as com argamassa de cimento Portland puro. Os dados indicam que a argamassa contendo PEA possui melhor resistência,

quando comparada à com EA comum, mas ainda é pior que a da argamassa com cimento Portland puro.

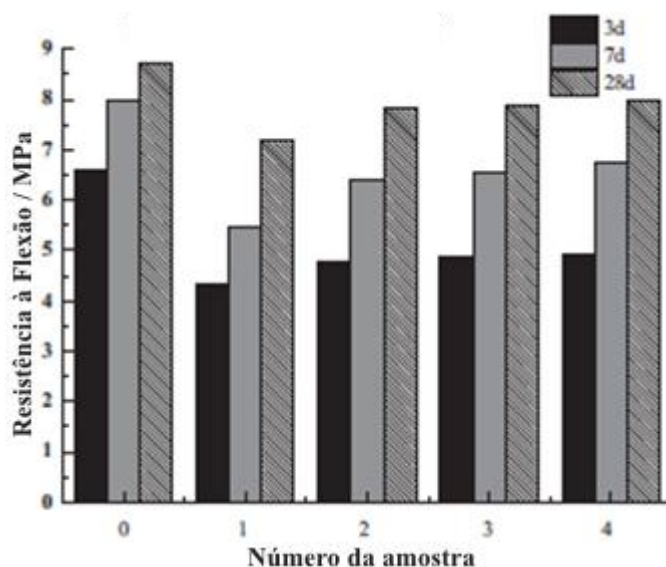


Figura 24: Resistência à flexão de argamassas de cimento contendo amostras de EA diferentes: (0) cimento Portland puro, (1) 70% cimento Portland + 30%EA, (2) 70% cimento Portland + 30%PEA1, (3) 70% cimento Portland + 30% PEA2, (4) 70% cimento Portland + 30% PEA3 (SHI, CHEN, *et al.*, 2015).

Roslan et al. (2016) estudaram a resistência à compressão do concreto contendo PEA em diferentes proporções, com relações água/ligante de 0,58 e areia/ligante de 2,46 e construiu o gráfico da Figura 25 com os dados coletados. Como já era de se esperar, os valores iniciais de resistência não foram muito altos, devido à demora na hidratação do PEA mas, aos 90 dias de cura, a resistência das amostras de concreto contendo PEA, com exceção da amostra com 5% de PEA, tiveram resistência maior que o concreto de cimento Portland puro.

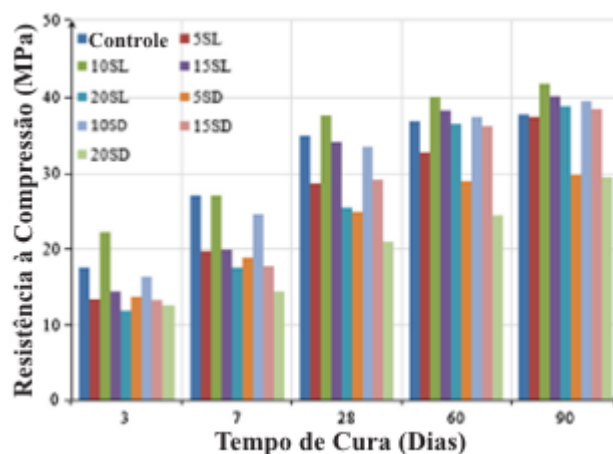


Figura 25: Resistência à compressão do concreto com PEA (ROSLAN, ISMAIL, *et al.*, 2015).

Shi et al. (2015) demonstraram que PEA com granulometria mais fina é melhor para a resistência mecânica. Apesar de apresentar uma queda na resistência final, a argamassa com PEA apresentou resistência à compressão satisfatória, alcançando os 50 MPa, como mostra o gráfico da Figura 26.

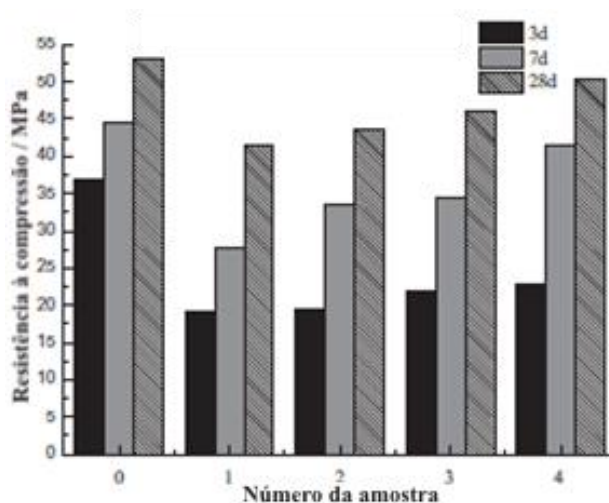


Figura 26: Resistência à compressão de argamassas de cimento contendo amostras de EA diferentes: (0) cimento Portland puro, (1) 70% cimento Portland + 30% EA comum, (2) 70% cimento Portland + 30% PEA1, (3) 70% cimento Portland + 30% PEA2, (4) 70% cimento Portland + 30% PEA3 (SHI, CHEN, *et al.*, 2015).

Yan et al. (2013) demonstram que, à temperatura de 25°C, a argamassa contendo PEA possui resistência à compressão menor que a da argamassa de cimento Portland puro, após três dias de cura e com relação água/ligante de 0,4. O que era esperado, pelos motivos citados anteriormente neste mesmo trabalho, que fazem também com que a resistência diminua com o aumento da proporção de EA na argamassa. Quando a temperatura de cura é elevada para 50°C, é nítida a melhora na resistência à compressão das argamassas e a diferença entra a resistência da argamassa de cimento Portland puro e a de cimento Portland com PEA diminui.

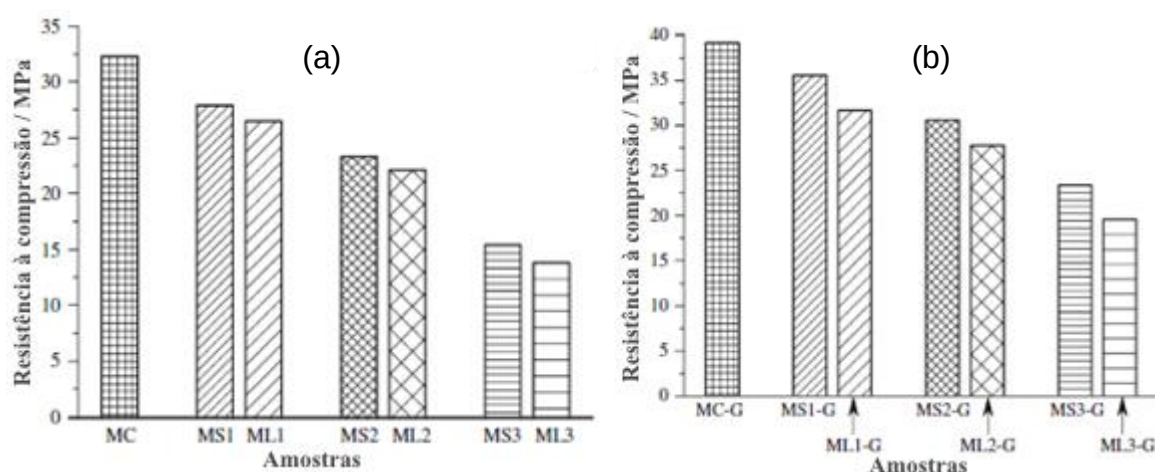


Figura 27: Resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de PEA, após 3 dias de cura, a uma temperatura de cura de: (a) 25°C e (b) 50°C.

Amostras: (MC / MC-G) argamassa de cimento Portland puro, (MS1 / MS1-G) argamassa com 85% cimento Portland e 15% PEA, (ML1 / ML1-G) argamassa com 85% cimento Portland e 15% pó de calcário, (MS2 / MS2-G) argamassa com 70% cimento Portland e 30% PEA, (ML2 / ML2-G) argamassa com 70% cimento Portland e 30% pó de calcário, (MS3 / MS3-G) argamassa com 55% cimento Portland e 45% PEA e (ML3 / ML3-G) argamassa com 55% cimento Portland e 45% pó de calcário (YAN, MI e WANG, 2013).

Segundo resultados obtidos nos ensaios realizados por Xiaolu et al. (2014), a resistência à compressão do concreto com apenas EAF é um pouco maior que a resistência dos concretos com EA e EA+ativador. A adição dos ativadores gesso de dessulfuração e sulfato de sódio auxiliaram na melhora da resistência do concreto com EA, conforme Figura 28.

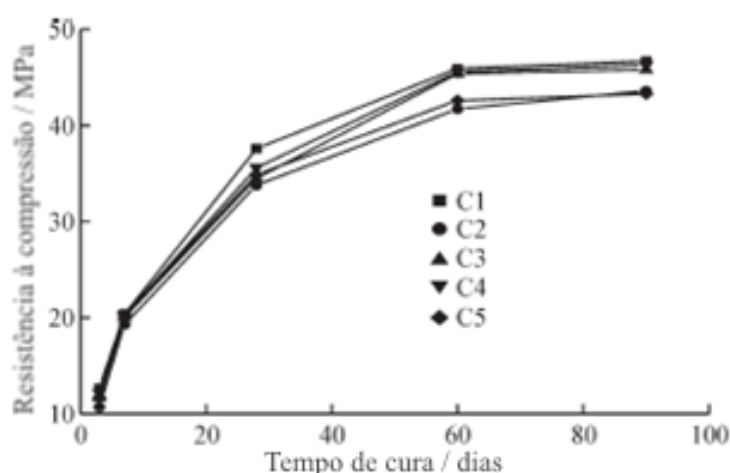


Figura 28: Resistência à compressão de concreto com EAF e concreto com EAF-EA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUI SHENG e KAI, 2014).

Qiang et al. (2013) avaliaram a resistência à compressão do concreto, levando em consideração as relações água/ligante de 0,5 e 0,35. Pelos gráficos da Figura 29, percebe-se, mais uma vez, que a resistência diminui de acordo com o aumento na proporção de EA no concreto. Mesmo com a relação água/ligante de 0,5, a resistência do concreto com 15% de EA é praticamente igual à do concreto de cimento Portland puro. Com a relação água/ligante de 0,35, o concreto melhor muito sua resistência e até com a substituição de 45% de EA consegue atingir resistência superior a 70 MPa.

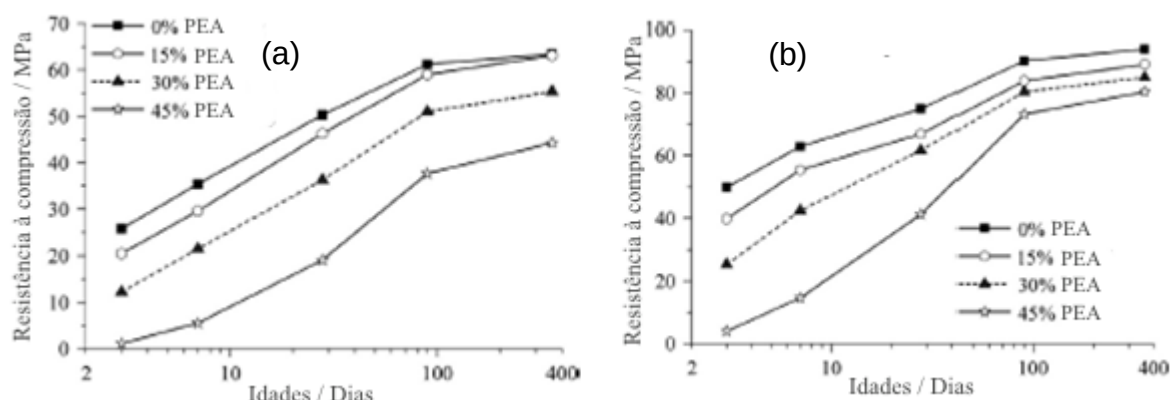


Figura 29: Resistência à compressão do concreto com relação água/ligante de: (a) 0,5 e (b) 0,35 (QIANG, PEIYU, *et al.*, 2013).

A partir dos experimentos analisados, é possível averiguar que o concreto com 30% de PEA não possui resistência à flexão tão inferior, quando comparado com o concreto de cimento Portland puro. Também é possível concluir que, novamente, devido à sua baixa reatividade, o PEA possui efeito negativo nas resistências à compressão iniciais e finais do concreto. Foi atestado que, para suavizar o problema, pode-se utilizar ativadores, aumentar a temperatura externa durante a hidratação e reduzir a relação água/ligante. Esses métodos auxiliam no aumento da resistência à compressão, pois, como falado anteriormente, aceleram a ativação do PEA e, consequentemente, aceleram a hidratação do concreto e aumentam a geração de produtos de hidratação.

4.3.5 Resistência à Abrasão

Xiaolu *et al.* (2014) investigaram a resistência à abrasão do concreto contendo EAF e EAF-PEA. Essa resistência foi avaliada através da força de desgasta que o material usado pode suportar, até uma certa profundidade. Pela Figura 32, observa-se que a adição de PEA melhorou a resistência a abrasão do concreto de EAF, devido ao fato de a dureza do PEA ser muito maior que a da EAF, com isso, PEA contribui de forma importante para a dureza do concreto.

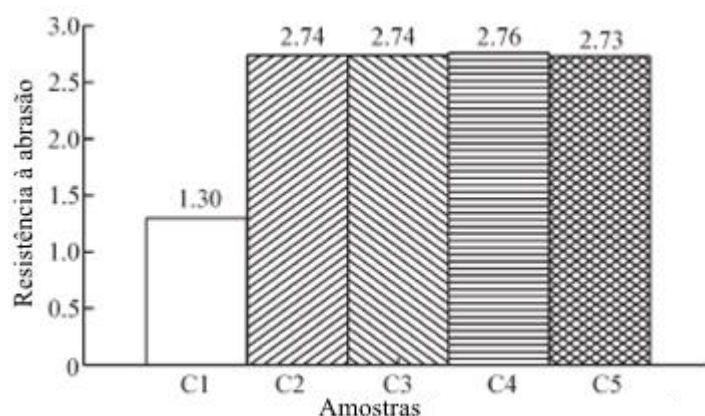


Figura 30: Resistência à abrasão do concreto com EAF e com EAF-PEA. Amostras: (C1) 50% cimento Portland e 50% EAF; (C2) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA; (C3) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA com resíduo de dessulfuração; (C4) 50% cimento Portland, 35% EAF e 15% PEA com sulfato de sódio; (C5) 50% cimento Portland e 35% EAF e 15% PEA com gesso de dessulfuração (XIAOLU, HUI SHENG e KAI, 2014).

Devido à dureza elevada da EA, a utilização do PEA na matriz cimentícia leva ao aumento da dureza do concreto e, consequentemente, ao aumento da resistência à abrasão. Esse fato é importante quando pretende-se utilizar o concreto em peças que sofrem com constantes impactos ou desgastes devido a intempéries e trânsito de pessoas e veículos, por exemplo.

5 CONCLUSÃO

A partir de todos os estudos analisados nesse trabalho, é possível fazer diversas constatações a respeito do uso dos *Powders* de Escória de Aciaria (PEA) em concretos, em especial o Concreto de Alto Desempenho (CAD).

A adição de PEA reduziu o calor de hidratação e o tempo de pega, pois sua presença gera retardamento das reações químicas de hidratação, devido à baixa reatividade da EA. Entretanto, o aumento da temperatura de cura acelera a ativação do PEA, fazendo com que sua hidratação ocorra com maior velocidade, gerando mais produtos de hidratação, que são os principais responsáveis pelas características mecânicas do concreto. Alguns experimentos também mostraram que, diminuindo-se a granulometria do PEA, aumenta-se seu calor de hidratação, o que significa que as reações ocorrem mais rapidamente e geram mais produtos, melhorando as características do concreto. A alcalinidade do PEA também foi um ponto estudado e que, segundo a pesquisa, auxilia no aumento da sua ação.

Outro ponto importante é a relação água/ligante. Seu aumento traz efeitos negativos mesmo para o concreto convencional, mas é ainda mais prejudicial para aqueles com PEA. Por isso, quanto menor for a relação água/ligante, melhores serão as propriedades do concreto com PEA, o que é factível no CAD, já que, em geral, ele é confeccionado com baixo fator água/cimento. Para compensar a falta de água na pasta, pode-se utilizar superplastificantes, aumentando a trabalhabilidade do concreto e a ativação do PEA.

Foi comprovado também, através dos estudos, que é possível obter concretos com mais de 70 MPa de resistência, mesmo com 45% de substituição de cimento Portland por PEA. Observou-se que a resistência dos concretos com PEA melhora em idades maiores – em torno de 60 – 90 dias, e que até 20% de escória de aciaria pode ser aplicado no concreto convencional de cimento Portland sem prejudicar consideravelmente a sua qualidade em qualquer idade.

A partir dessas constatações, é comprovado que é possível a produção de CAD com PEA, mas é necessário fazer um controle meticuloso de todo o processo, desde o processamento e moagem da EA, até a mistura dos materiais para produção do concreto. Com isso, a conclusão é que o PEA pode ser aplicada, preferencialmente,

na produção de pré-moldados de CAD, tendo em vista que é mais fácil monitorar e controlar as condições ambientes e dos materiais utilizados em sua confecção. Os pré-moldados produzidos poderiam ser, por exemplo, vigas, pilares e lajes para pontes, viadutos e edifícios, paredes estruturais e tetrápodes.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1991.
- BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do Concreto de Alto Desempenho e sua Aplicação no Projeto de Pilares**. São Carlos. 1998.
- DONGXUE, L. et al. Durability Study of Steel Slag Cement. **Cement and Concrete Research**, 29 Abril 1997. 983-987.
- DUDA, A. Hydraulic reactions of LD steelwork slags. **Cement and Concrete Research**, 5 Setembro 1989. 793-801.
- GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto**. Porto Alegre. 2001.
- GONÇALVES, D. R. R. **Análise da Viabilidade Econômica Via Simulação de Monte Carlo para Utilização da Escória de Aciaria como Agregado na Fabricação de Pré-Fabricados para a Construção Civil – Ecoblocos**. Ouro Preto. 2015.
- GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 251. 2002.
- GUO, X.; SHI, H. Utilization of Steel Slag Powder as a Combined Admixture with Ground Granulated Blast-Furnace Slag in Cement Based Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Dezembro 2013. 1990-1993.
- IABR. **Relatório de Sustentabilidade de 2016**. Rio de Janeiro. 2016.
- JANUZZI, R. V. **Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 136. 2014.
- MACHADO, A. T.; JOHN, V. M. **Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria**. São Paulo. 2000.
- MARINO, V. F. **Coeficiente de Conformação Superficial de Armaduras em Concreto Sustentável – Escória de Aciaria**. Ouro Preto. 2016.

MARINO, V. F. **Coeficiente de Conformação Superficial de Armaduras em Concreto Sustentável – Escória de Aciaria**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.

MASLEHUDDIN, M. et al. Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes. **Construction and Building Materials**, Março 2003. 105-112.

ONOUÉ, K. et al. Fatigue characteristics of steel-making slag concrete under compression in submerged condition. **Construction and Building Materials**, 20 Agosto 2014. 231-242.

QIANG, W. et al. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, 17 Julho 2013. 1414-1420.

QIANG, W.; PEIYU, Y. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, 13 Janeiro 2010. 1134-1140.

ROHDEN, A. B. **Efeito da Resistência e da Dimensão Máxima Característica do Agregado Graúdo nas Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho**. Porto Alegre. 2011.

ROSLAN, N. H. et al. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. **Construction and Building Materials**, 11 Dezembro 2015. 16-24.

SHI, C. Steel Slag - Its Production, Processing, Characteristics and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 23 Junho 2003. 230-236.

SHI, Y. et al. Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. **Construction and Building Materials**, 10 Março 2015. 227-234.

SILVA, M. J. D. **Elementos de Concreto para Pavimentação Produzidos com Agregados de Escória de Aciaria**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, p. 130. 2011.

SOUZA, B. P. D. **Aderência de Barras de Aço Tipo CA em Concreto Sustentável**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2015.

SOUZA, E. B. D. O. E. **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Belo Horizonte. 2007.

THOMAZ, E. O que caracteriza o concreto de alto desempenho, qual é sua aplicação e como o mercado tem usado essa alternativa? **Téchne**, 2016.

WANG, Q.; YAN, P.; MI, G. Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. **Construction and Building Materials**, 12 Abril 2012. 8-14.

WANG, Q.; YANA, P.; FENG, J. A Discussion on Improving Hydration Activity of steel slag by altering its mineral compositions. **Journal of Hazardous Materials**, 3 Dezembro 2010. 1070–1075.

WANG, Q.; YANG, J.; YAN, P. Cementitious properties of super-fine steel slag. **Powder Technology**, 21 Abril 2013. 35-39.

XIAOLU, G.; HUIHENG, S.; KAI, W. Effects of Steel Slag Powder on Workability and Durability of Concrete. **Journal of Wuhan University of Technology**, 21 Janeiro 2014.

YAN, P.; MI, G.; WANG, Q. A comparison of early hydration properties of cement–steel slag binder and cement–limestone powder binder. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 15 Agosto 2013. 193-200.

YAN, P.; WANG, Q.; MI, G. Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. **Construction and Building Materials**, Beijing, China, 25 Fevereiro 2012. 8-14.

YI, H. et al. An overview of utilization of steel slag. **Procedia Environmental Sciences**, 2012. 791-801.

YUN-FENG, L.; YAN, Y.; LING, W. Recycling of industrial waste and performance of steel slag green concrete. **J. Cent. South Univ. Technol.**, 28 Junho 2009. 768-773.

ZHAO, J. et al. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. **Construction and Building Materials**, 26 Março 2016. 835-842.

ZHUA, G. et al. Study on Cementitious Properties of Steel Slag. **Journal of Mining and Metallurgy**, 2 Fevereiro 2013. 217-224.