

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR - MG
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
RICARDO DOMINGOS DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA, GERADA EM FORNOS
CONVERSORES LINZ-DONAWITZ (LD), COMO ADIÇÃO EM CIMENTO CP II E 32**

FORMIGA – MG
2018

RICARDO DOMINGOS DOS SANTOS

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA, GERADA EM FORNOS CONVERSORES
LINZ-DONAWITZ (LD), COMO ADIÇÃO EM CIMENTO CP II E 32

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG,
como requisito para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Kátia Daniela Ribeiro

FORMIGA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

S237 Santos, Ricardo Domingos dos.
Utilização da Escória de Aciaria, gerada em fornos Conversores Linz-Donawitz(LD), como adição no cimento CP II E 32 / Ricardo Domingos dos Santos.– 2018.
59 f.

Orientadora: kátia Daniela Ribeiro.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –
Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Clinquer. 2. Gesso. 3. Resistência. I. Título.

CDD 690

Catálogo elaborado na fonte pela bibliotecária
Regina Célia Reis Ribeiro – CRB 6-1362

Ricardo Domingos dos Santos

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA, GERADA EM FORNOS CONVERSORES
LINZ-DONAWITZ (LD), COMO ADIÇÃO EM CIMENTO CP II E 32

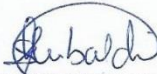
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG. como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA



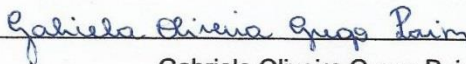
Prof.^a Dra. Kátia Daniela Ribeiro

Orientadora



Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi

UFLA



Gabriela Oliveira Grego Paim.

Engenharia Civil

Formiga, 08 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e sabedoria para vencer os desafios dos cinco anos de batalha na graduação como Engenheiro Civil e em especial nesta reta final da conclusão deste TCC, pois foram inúmeros finais de semana, feriados e demais momentos de lazer que foram trocados para dedicação a pesquisas e consolidação de informações.

Aos meus pais Pedro Domingos e Joana Darc Domingos, pelo amor, carinho e um olhar que sempre me motivou e inspirou força para acreditar que este sonho seria possível. À minha namorada Patrícia Cristina, por todo amor, dedicação e incentivo nos cinco anos de faculdade e em especial, o apoio nesta reta final.

Aos amigos de trabalho da CSN que foram de suma importância para a elaboração e conclusão deste TCC, meu sinceros agradecimentos a Janira Ferreira (coordenadora de qualidade), Luciano Martins (técnico especialista), João Paulo de Oliveira (técnico de garantia da qualidade), Elenilson Azarias (técnico de garantia da qualidade), Euripedes Pereira (técnico de garantia da qualidade) que me incentivaram e não mediram esforços desde o início me auxiliando com seus conhecimentos sobre as análises químicas, físicas e mecânicas do cimento.

Aos orientadores que nesta caminhada fizeram parte deste trabalho a começar pela Mariana Del Hoyo, (Eng^a. Civil Orçamentista), Michael Silveira Thebaldi (Prof. Dr. Recursos Hídricos), e no fechamento e conclusão deste TCC a Kátia Daniela (Prof.^a Dra. em Engenharia de Água e Solo) o meu muito obrigado por tudo.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade do desenvolvimento do cimento CP II E 32 com adição de escória de aciaria (LD). Para isto, foram realizados ensaios químicos, físicos e mecânicos com amostras de doze formulações que tiveram adições de escória de aciaria (LD) na proporção em massa de 3,5% a 12%, alternando as adições de escória de alto-forno de 13% a 25%, clínquer com adições que variaram de 56,5% a 61,5%, as adições de gesso e calcário foram fixadas em 3,5 e 10% respectivamente. Para todas as formulações foram observados os limites de composição regulamentados pela NBR 16697:2018. Os resultados químicos ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos pela referida norma e a formulação número 2, com adição de 3,5% de escória de aciaria (LD), 21,5% de adição de escória de alto-forno, 61,5% de clínquer, 3,5% de gesso e 10% de calcário foi a que apresentou melhor resistência à compressão, chegando a 35,9 MPa aos 28 dias (3,9 MPa maior do que o exigido pela NBR 16697:2018). As demais formulações apresentaram valores médios de resistência à compressão nas idades de 3 dias de 23,3 MPa, 7 dias de 28,4 MPa e com 28 dias de 35 MPa, estando todos os resultados dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 16697:2018. Conclui-se que a adição de escória de aciaria (LD), conforme formulações analisadas neste trabalho, atendem aos parâmetros químicos, físicos e mecânicos exigidos para a produção do cimento CP II E 32.

Palavras-chave: Clínquer. Gesso. Resistência.

ABSTRACT

This work aims to verify the possibility of the development of cement CP II E 32 with addition of steel slag (LD). For this, chemical, physical and mechanical tests were performed with samples of twelve formulations that had additions of steel slag (LD) in the mass ratio of 3.5% to 12%, alternating the additions of blast furnace slag of 13 % to 25%, clinker with additions ranging from 56.5% to 61.5%, additions of gypsum and limestone were set at 3.5 and 10% respectively. For all formulations, the composition limits regulated by NBR 16697: 2018 were observed. The chemical results were within the parameters established by said standard and formulation number 2, with addition of 3.5% of steel slag (LD), 21.5% addition of blast furnace slag, 61.5% of clinker, 3.5% gypsum and 10% limestone showed the best compressive strength, reaching 35.9 MPa at 28 days (3.9 MPa higher than required by NBR 16697: 2018). The other formulations presented average values of compressive strength at the ages of 3 days of 23.3 MPa, 7 days of 28.4 MPa and 28 days of 35 MPa, all results being within the standards established by NBR 16697: 2018. It is concluded that the addition of steel slag (LD), according to the formulations analyzed in this work, meet the chemical, physical and mechanical parameters required for the production of cement CP II E 32.

Keywords: Clinker. Plaster. Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidas geométricas para molde e soquete	41
Figura 2 - Misturador Mecânico.....	42
Figura 3 - Soquete utilizado no ensaio.....	43
Figura 4 - Câmara úmida.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resíduos sólidos e impactos ambientais da produção de aço.....	35
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Aplicação da escória de aciaria no Brasil.	34
Gráfico 2 - Aplicação da escória de aciaria nos demais países.	34
Gráfico 3 -Resíduo insolúvel das 12 formulações de cimento avaliadas.....	45
Gráfico 4 - Perda ao fogo das 12 formulações de cimento avaliadas.	47
Gráfico 5 - Trióxido de Enxofre (SO ₃) das 12 formulações avaliadas.	48
Gráfico 6 - Índice de finura das 12 formulações avaliadas.....	49
Gráfico 7 - Tempo de início de pega das 12 formulações avaliadas	50
Gráfico 8 - Expansibilidade a quente das 12 formulações avaliadas.	51
Gráfico 9 - Médias das resistências das 12 formulações avaliadas	53

TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland	21
Tabela 2 - Requisitos químicos do Cimento Portland (expresso em % de massa). ...	21
Tabela 3 - Principais compostos químicos do clínquer e suas propriedades.	22
Tabela 4 - Requisitos físicos e mecânicos.	23
Tabela 5 - Resistência à compressão (MPa) por idade (dias).....	23
Tabela 6 - Critérios de conformidade para classe de resistência.	24
Tabela 7 - Tipos de cimentos e suas adições.	24
Tabela 8 - Sequência de reações no processo de fabricação da clinquerização.	25
Tabela 9 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) ...	25
Tabela 10 - Composição química das escórias de aciaria LD e escórias de alto-forno.	32
Tabela 11- Formulações base das amostras de 1 a 12.	37
Tabela 12- Exigências físicas e mecânicas do CP II E 32	40
Tabela 16 - Tolerância de tempo para a ruptura.	43
Tabela 17 - Formulações base com Adição de Escória de Aciaria (LD)	46
Tabela 18- Resultado expansibilidade quente.....	52
Tabela 19 - Resultados das resistências à compressão das amostras analisadas...	52
Tabela 20 - Desvio padrão e coeficiente de variação nas idades de 1,3,7 e 28 dias	53
Tabela 21 - Resultados dos ensaios à compressão	54

LISTAS DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
C	Celsius
CaO	Cal
Ca(OH) ₂	Óxido de Cálcio
Co	Monóxido de carbono
CO ₂	Gás carbônico
CP	Cimento <i>Portland</i>
E	Escória
Fe	Ferro
FeO	Óxido de ferro
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
Kg	Quilograma
LD	<i>Linz e Donawitz</i>
MG	Minas Gerais
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mm	Milímetros
MnO	Óxido de Manganês
Mt	Mega Tonelada
NO _x	Óxidos de nitrogênio (NO ₂ e NO ₃)
P ₂ O ₃	Anidrido Fosforoso
RJ	Rio de Janeiro
S	Enxofre
SAE	<i>Society Automotive Enginners</i>
SiO ₂	Dióxido de silício
Sr	Senhor (abreviatura em inglês)
SO _x	Óxidos de enxofre (SO ₂ e SO ₃)
T	Tonelada

TiO₂

Dióxido de Titânio

VOC's

Compostos orgânicos voláteis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	JUSTIFICATIVA.....	17
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
4.1	Cimento Portland.....	18
4.1.1	Processo de produção do cimento Portland	19
4.1.2	Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento PORTLAND.....	21
4.2	Ferro-gusa e aço	26
4.2.1	Processo de fabricação do ferro-gusa e aço	27
4.3	Aciarias LD – breve histórico	29
4.3.1	Geração das escórias de aciarias.....	30
4.3.2	Composição química da escória de aciaria LD e suas propriedades físicas.....	31
4.3.3	Aplicações da escória de aciaria LD.....	33
4.3.4	Passivos ambientais gerados pela escória de aciaria LD	35
5	MATERIAL E METÓDOS	36
5.1	Obtenção das matérias primas	36
5.2	Preparação da Escória de Aciaria (LD) para adição na produção do cimento Portland	36
5.3	Produção do cimento em laboratório	37
5.4	Análise dos requisitos químicos do cimento Portland CP II E 32.....	38
5.4.1	Determinação do Resíduo Insolúvel (RI) – ABNT NBR NM 15:2004.....	38
5.4.2	Determinação de perda ao fogo – ABNT NBR NM 18:2012.....	39
5.4.3	Trióxido de enxofre (SO₃) - ABNT NBR NM 16:2012.....	39
5.5	Ensaio para a verificação das exigências físicas e mecânicas.....	39
5.5.1	Determinação do índice de Finura por peneirador dinâmico – ABNT NBR 11579:2012.....	40
5.5.2	Tempo de início de pega – NBR 16607 (ABNT, 2017).....	40
5.5.3	Expansibilidade a quente – NBR 11582 (ABNT, 2016).....	41

5.5.4	Ensaio para verificação da resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 1997)	41
5.6	Análise de dados	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1	Resultados das análises químicas	45
6.1.1	Determinação do resíduo insolúvel	45
6.1.2	Determinação de perda ao fogo	46
6.1.3	Trióxido de enxofre	48
6.2	Resultados das análises físicas e mecânicas	49
6.2.1	Índice de finura por amostra	49
6.2.2	Tempo de início de pega	50
6.2.3	Expansibilidade a quente	51
6.2.4	Resistência à compressão	52
7	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os resíduos industriais têm recebido maior atenção para a reciclagem e aplicação alternativa. Este fato atribui-se tanto a aspectos econômicos quanto ambientais, ressaltando motivos que valorizam a proposta de reutilização, a exemplo da escória de aciaria (LD), que a cada 1 tonelada de aço produzido é gerado em torno de 100 a 150 kg de escória de aciaria (CRUZ et al., 1999 apud GUMIERI, 2002).

No primeiro trimestre de 2018, no Brasil, foram produzidos 8,6 milhões de toneladas de aço bruto (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). A Usina Presidente Vargas, em Volta Redonda – RJ, atual Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), possui 2 altos-fornos com capacidade de geração anual ao redor de 1,6 Mt (Um milhão e seiscentas mil toneladas) de escória granulada de alto-forno e de 0,6 Mt (Seiscentas mil toneladas) de escória de aciaria (LD) (SILVA et al., 2015), o que demonstra a amplitude da quantidade de escória de aciaria (LD) que é gerada anualmente pelos demais grupos siderúrgicos brasileiros, que segundo Ramos et.al ([20--]) referem-se aos grupos de empresas: ArcelorMittal, Grupo Usiminas, CSN, Grupo Gerdau, V&M do Brasil, Aços Villares, Votorantim e Villares Metais.

Para a produção de cimento, o Brasil utiliza em sua maioria a escória de alto-forno; já a escória de aciaria (LD), produzida na conversão do ferro-gusa para aço, ainda não é tão aproveitada e, com isso, se acumula nas usinas (RAMOS et al., ([20--])).

A composição base para as diversas classes do cimento são clínquer mais sulfatos de cálcio, escória granulada de alto-forno, material pozolânico e material carbonático em suas devidas proporções, conforme Norma Brasileira Regulamentador - NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2018).

A adição da escória de aciaria (LD) na produção do cimento Portland CP II E 32 torna-se uma opção ambientalmente correta pelo fato de permitir a reutilização deste produto como forma de sua destinação final. Desta forma, as indústrias cimenteiras podem oferecer aos ramos siderúrgicos mais uma opção de destinação final deste resíduo, já que a sua utilização no Brasil está mais aplicada em obras rodoviárias, lastros de ferrovias, concretos e argamassas, como agregado, como fertilizante e corretivo de solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar as influências químicas e mecânicas da adição de escória de aciaria do processo LD na produção do cimento CP II E 32 em uma cimenteira na cidade de Arcos – MG.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar análises químicas do cimento CP II E 32 que tiveram a adição de escória de aciaria do processo LD, a fim de verificar se atende aos requisitos da tabela 3 – Requisitos químicos do cimento Portland, da NBR 16697 (ABNT, 2018);
- Verificar os resultados de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias dos corpos de prova obtidos com a adição de escória de aciaria LD no processo de produção do cimento Portland CP II E 32, analisando se foram satisfatórias perante a tabela 4 - Requisitos físicos e mecânicos da NBR 16697 (ABNT, 2018).

3 JUSTIFICATIVA

A utilização da escória de aciaria é benéfica ao meio ambiente por diversas razões, na medida em que se pode substituir minerais não metálicos cuja extração impacta o meio ambiente, como brita, areia e calcário. Primeiramente, o uso da escória de aciaria reduz as necessidades de consumo destes recursos naturais primários e não renováveis. Por outro lado, usar escória significa reduzir a quantidade de material a dispor em aterros ou estocado em pilhas. Adicionalmente, em algumas aplicações, o emprego de escória de aciaria promove outros benefícios ao meio ambiente (RAMOS et.al. ([20--])).

A adição de escória de aciaria (LD) na produção do cimento CP II E 32 pode gerar resultados satisfatórios perante os parâmetros químicos, físicos e mecânicos, justificando a relevância deste trabalho. Adicionalmente, ao se incorporar a escória de aciaria na produção do cimento, será possível a retirada de toneladas desse resíduo dos pátios siderúrgicos, oferecendo uma destinação final adequada para o mesmo, minimizando-se um passivo ambiental.

De acordo com Ramos et al., ([20--]), o recurso de hoje é o que não foi recurso ontem. Poderá ser recurso amanhã o que não foi percebido como recurso hoje.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Cimento Portland

Cimento Portland é um pó fino acinzentado, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, com inúmeras propriedades e características, dentre as quais ser moldável quando misturado com água e ser capaz de desenvolver elevada resistência mecânica ao longo do tempo (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

É o produto obtido pela pulverização de *clinker* constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego (BAUER, 2011), sendo obtido pela mistura íntima de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro (NEVILLE, 2016).

A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002) cita que a origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de *Santorino* ou das proximidades da cidade italiana de *Pozzuoli*, que possuíam propriedades de endurecimento sob ação da água.

Adicionalmente, de acordo com Neville (2016), a utilização de materiais cimentícios é bastante antiga. Os antigos egípcios utilizam gesso impuro. Os Gregos e os Romanos utilizavam calcário calcinado e, mais tarde, aprenderam a adicionar areia e pedra fragmentada ou fragmentos de tijolos ou telhas ao calcário e à água. Esse foi o primeiro concreto da história.

Battagin (2006) menciona que, por volta de 1988, estudos sobre a fabricação de cimento foram feitos no Brasil, quando Antônio Proost Rodvalho, instalou em sua própria fazenda uma fábrica de cimento localizada na cidade de Sorocaba- SP. Junto a ele, várias outras pequenas fábricas entraram em funcionamento nos anos seguintes. Porém, não obtiveram sucesso, fechando-se por problemas com a qualidade, baixa produção ou dificuldades para competir com cimentos importados.

Ainda segundo o mesmo autor, depois de inúmeras tentativas sem sucesso, finalmente em 1924, foi implantada na cidade de Perus, no estado de São Paulo, a

Companhia Brasileira de Cimento Portland, cuja a implantação foi considerada um marco para a indústria brasileira de cimento.

4.1.1 Processo de produção do cimento Portland

Ribeiro, Pinto e Starling (2011) afirmam que a fabricação do cimento *Portland* é resultante da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pela calcinação de uma mistura crua de calcário e argila, dosados e homogeneizados convenientemente. Após a queima, é feita uma adição de gesso a fim de impedir que as reações de hidratação entre o cimento e a água, quando da utilização do cimento, se processem instantaneamente. Ainda segundo o mesmo autor, o clínquer é um produto que sai do forno em fórmula de nódulos escurecidos e que depois de resfriado e moído, recebe adição do gesso (CaSO_4 – sulfato de cálcio).

Para Gomide (1996), o processo de fabricação do cimento consiste em processo físico-químico de transformação mineral, como calcário, argila, minério de ferro e areia em uma mistura de materiais sintéticos que possuem capacidade de reagir com a água e desenvolver propriedades resistentes à compressão.

O clínquer é obtido pelo cozimento, em grande forno rotativo a uma temperatura de aproximadamente 1450°C , até a fusão da mistura de calcário e argila, em uma moagem final, adiciona-se o gesso, escória, pozolana e filer que compõem os diversos tipos de cimento do mercado (PETRUCCI, 1998; NEVILLE, 2016).

Segundo Bauer (2011), o cimento Portland é atualmente produzido em instalações industriais de grande porte, localizadas junto a jazidas que se encontram em situação favorável quanto ao transporte do produto acabado aos centros consumidores. As matérias primas utilizadas na fabricação do cimento Portland são, usualmente, misturas de materiais calcários e argilosos em proporções adequadas em que resultem em composições químicas apropriadas para o cozimento. A fabricação do cimento Portland comporta seis operações principais, a saber:

- Extração de matéria-prima
- Britagem
- Moedura e mistura
- Queima
- Moedura do clínquer

- Expedição.

A extração de minerais ou matérias-primas naturais consideradas primárias, como calcário calcítico e argila, é realizada em jazidas ou minas que geralmente estão localizadas próximas das fábricas, facilitando as questões operacionais e de custo de produção. Esta etapa do processo é fundamental para a fabricação do clínquer e com ela se inicia todo o processo de verificação das composições físicas e químicas das matérias-primas (LOPES, 2009).

A matéria-prima, quando rochosa, é submetida a uma operação de beneficiamento com o propósito de reduzir o material à condição de grãos de tamanho conveniente. Trata-se da britagem, operação também comum no processo de exploração de pedreiras para produção de agregados. Os materiais britados, calcário, por exemplo, são encaminhados a depósitos apropriados, de onde são processados segundo suas linhas principais de operação (BAUER, 2011).

De acordo com o documento de *Foreign Land* (2010), a preparação da mistura crua, que leva também o nome de cru ou farinha, consiste no tratamento das matérias-primas nos britadores e moinhos de bolas ou verticais, para que o material seja reduzido à granulação média de 0,050 mm. Ao mesmo tempo em que o material é submetido à moagem, inicia-se a mistura das matérias-primas.

Bauer (2011) menciona que a operação de queima da mistura crua é devidamente proporcionada num forno onde, pela combustão controlada de carvão, gás ou óleo, a temperatura é elevada aos níveis necessários à transformação química que conduz à produção do clínquer, subseqüentemente resfriado, é, talvez, a mais importante fase de fabricação do cimento.

Para Milanés (2009), o cimento é resultado da moagem do componente principal do cimento, o clínquer, mais sulfato de cálcio e aditivos (pozolanas, escórias de alto forno, calcário, entre outros). Na moagem destes materiais podem utilizar-se de moinhos verticais ou moinhos tubulares com uma, duas ou três câmaras, funcionando em circuito aberto ou fechado. Quando há utilização de circuito fechado, utilizam-se separadores para rejeitar partículas mais grossas que retornam ao circuito de moagem.

O cimento pode ser fornecido a granel ou sacos de 50 kg. Máquinas automáticas fazem o enchimento dos sacos e os liberam assim que atingem o peso de 50 kg. O carregamento também é automatizado, buscando a otimização da expedição. A embalagem é composta de papel *Kraft* de múltiplas folhas, que protege

o cimento da umidade e do manuseio no transporte, sendo que as embalagens recebem a data e hora da expedição (DE PAULA, 2009).

4.1.2 Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento PORTLAND

Neville (2013) classifica quatro compostos que são destacados como os principais constituintes do cimento e estão listados na TAB.1, juntamente com as suas abreviações. Essa denominação abreviada, utilizada pela química de cimento, descreve cada óxido por uma letra, ou seja: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$.

Tabela 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland

Nome do Compostos	Composição em Óxidos	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO SiO_2	C_3S
Silicato Dicálcico	2CaO . SiO_2	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AFe

Fonte: NEVILLE (2013).

Quanto a suas exigências químicas, a NBR 16697 (ABNT,2018) determina que o cimento Portland deve estar de acordo com os requisitos químicos em função do seu tipo (TAB 2).

Tabela 2 - Requisitos químicos do Cimento Portland (expresso em % de massa).

Sigla ^a	Resíduo Insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CPI	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V ^b	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB ESTRUTURAL	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

a - Requisitos aplicáveis também aos cimentos a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida de sufixos RS ou BC, respectivamente.

b- No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Fonte: NBR 16697- Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018).

Ribeiro, Pinto e Starling (2011) apresentam os principais compostos químicos do clínquer e suas propriedades (TAB.3).

Tabela 3 - Principais compostos químicos do clínquer e suas propriedades.

Compostos	Formula Química	Abreviatura	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$		Endurecimento rápido
Tricálcio	50 – 65%	C_3S	Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$		Endurecimento lento
Dicálcico	15- 25 %	C_2S	Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$		Pega muito rápida controlada com adição de gesso.
Tricálcio	6 -10%	C_3A	Suscetível ao ataque de sulfatos. Alto calor de hidratação, alta retração e Baixa resistência final
Ferro	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não contém contribuição para resistência, cor escura
Aluminato Tetracálcio	Fe_2O_3 3 – 8%		
Cal Livre	CaO	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras

Fonte: Ribeiro, Pinto e Starling (2011).

O cimento Portland deve estar de acordo com os requisitos físicos e mecânicos da TAB.4, em função de seu tipo e classe, conforme preconiza o boletim técnico da ABCP.

Tabela 4 - Requisitos físicos e mecânicos.

Tipos de Cimento	Class e	Finura		Tempo de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira de 75 mm (%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	01 dia (MPa)	03 dias (MPa)	07 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CPI	25	≤ 12,0	≥240						≥ 8,0	≥ 15	≥ 25	
CPI-S	32		≥260	≥1	≤ 10	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 10	≥280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CP II E	25		≥240						≥ 8,0	≥ 15	≥ 25	
CP II-Z	32	≤12	≥ 260	≥1	≤ 10	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
CP II-F	40	≤ 10	≥ 280						≥ 15	≥ 25	≥ 40	
	25								≥ 8,0	≥ 15	≥ 25	≥ 32
CP III	32	≤ 8	-	≥1	≤ 12	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40
	40								≥ 15	≥ 23	≥ 40	≥ 48
CP IV	25								≥ 8,0	≥ 15	≥ 25	≥ 32
	32	≤8	-	≥1	≤ 12	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40

Fonte: Boletim Técnico da ABCP (2002).

Ribeiro, Pinto e Starling (2011) mostram na TAB.5 a evolução das resistências do cimento em função das idades.

Tabela 5 - Resistência à compressão (MPa) por idade (dias).

Tipos e Classes de Cimento	1 d	3 d	7 d	28 d	90 d
CP I- 32	-	10	20	32	-
CP II E- 32	-	10	20	32	-
CP II E – 40	-	15	25	40	-
CP III- 32	-	10	20	32	40
CP IV-32	-	10	20	32	40
CP V- ARI	11	22	32	>32	>32

Fonte: Ribeiro, Pinto e Starling (2011)

Para a NBR 16697 (ABNT, 2018) os requisitos para verificação da conformidade com base na resistência à compressão, em função do tipo e classe do cimento Portland, estão estabelecidos na TAB.6 e devem ser verificados por ensaios realizados conforme a NBR 7215 (ABNT,1997).

Tabela 6 - Critérios de conformidade para classe de resistência.

Tipo de cimento	Classe de resistência	Resistência a compressão (MPa)		
		Limite inferior aos 7 dias	Limite inferior aos 28 dias	Limite superior aos 28 dias
CP I	25	-	25	42
CP I-S				
CP II- E	32	-	32	49
CP II- F				
CP II-Z				
CP III	40	-	40	-
CP IV				
CPB Estrutural	ARI	34	-	-
CP V				

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os tipos de cimento Portland em função das adições (composição % em massa) podem ser vistos na TAB.7 (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

Tabela 7 - Tipos de cimentos e suas adições.

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Clinker	Escória	Pozolana	Materiais Carbonáticos.
CP comum	CP I	100	0	0	0
CP com adição	CP I-S	95 -99	0	1-5	0
CP com Escória	CP II-E	56-94	6-34	0	0-10
CP com Pozolana	CP II- Z	76 -94	-	6-14	0-10
CP com Filer	CP II -F	90 -94	-	-	6-10
CP de Alto-Forno	CP III	25-65	35-70	-	0-5
CP Pozolânico	CP IV	50-85	-	15-50	0-5
CP de Alta Resistência Inicial	CP V ARI	95-100	0	0	0-5

Fonte: (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

Os mesmos autores descrevem que a sequência de reações no processo de fabricação da clínquerização ocorrem de acordo com o apresentado na TAB 8.

Tabela 8 - Sequência de reações no processo de fabricação da clínquerização.

Temperatura	Processo
Até 100° C	Evaporação da água livre
100° C – 500° C	Calcinação das argilas
500° C – 900° C	Modificações estruturais nos silicatos Decomposição dos carbonatos
900° C – 1200° C	Reação de CaO com os sílico-aluminatos
> 1200° C	Formação dos compostos do cimento - clínquerização

Fonte: (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

Recentemente, a NBR 16697 (ABNT, 2018) apresentou algumas alterações nos limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa) nos tipos de cimento e suas adições (TAB.9).

Tabela 9 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clinker + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I CP I -S			95- 100 90-94		0-5 0	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II -E			51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II- Z	25,32 ou 40		71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II -F		RS ou BC	75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90-100	0	0	0-10
Cimento Portland branco	Estrutural Não estrutural	C P B	25,32 ou 40 -	75-100 50-74	- -	- -	0-25 26-50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial a sulfatos (CPV- ARI RS), podem ser adicionados escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

4.2 Ferro-gusa e aço

O ferro-gusa é o produto da redução do minério de ferro em alto-forno que contém elevado teor de carbono, devido ao contato próximo com o coque ou carvão vegetal os quais atuam como combustível e redutor simultaneamente (SILVA, 2011).

Ainda segundo o mesmo autor geralmente o ferro-gusa tem de 3,0 a 4,5% de carbono e uma grande quantidade de impurezas, por isso, não é utilizado industrialmente, devendo ser purificado antes da sua utilização. As impurezas principais são: carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre.

Para Silva e Mei (2010), o ferro gusa é a forma intermediária pela qual passa praticamente todo o ferro usado na produção primária do aço. Além desse emprego, o ferro-gusa pode ser empregado em fundições para a produção de fundidos de ferro. Genericamente, pode-se definir ferro-gusa pela composição química situada nas seguintes faixas:

- Carbono 3,5 a 4,5%
- Silício 0,3 a 2,0%
- Enxofre 0,01 a 0,1%
- Fósforo 0,05 a 2,0%
- Manganês 0,5 a 2,0%

O aço é uma liga metálica que contém de 0,002% a 2,0% do peso em carbono, além de outros elementos de liga nas mais variadas quantidades limitadas dos elementos carbono, silício, manganês, cromo, enxofre e fósforo. Outros elementos existem apenas em quantidades residuais (MALYNOWSKYJ, 2011).

Ainda segundo o mesmo autor, a quantidade de carbono presente no aço define sua classificação: os baixos-carbonos possuem no máximo 0,30% de carbono; os médio-carbonos possuem de 0,30% a 0,60%; e os alto-carbonos possuem de 0,60% a 1,00%.

Para Pfeil (2014) o aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11%. O carbono aumenta a resistência do aço, porém o torna mais frágil. Os aços com baixo teor de carbono têm menor resistência à tração, porém são mais dúcteis. As resistências à ruptura por tração ou compressão dos aços utilizados em estruturas são iguais, variando entre amplos limites, desde 300 MPa até valores acima de 1200 MPa.

Os aços, em geral são classificados em Grau, Tipo e Classe. O Grau normalmente identifica a faixa de composição química do aço. O Tipo identifica o processo de desoxidação utilizado, enquanto a Classe é utilizada para descrever outros atributos, como nível de resistência e acabamento superficial (MALYNOWSKYJ, 2011).

O mesmo autor ainda cita a designação do Grau, Tipo e Classe utilizando uma letra, número, símbolo ou nome. Existem vários sistemas de designação para os Aços, como o SAE (*Society of Automotive Engineers*), AISI (*American Iron and Steel Institute*), ASTM (*American Society of Testing and Materials*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

4.2.1 Processo de fabricação do ferro-gusa e aço

O ferro obtido diretamente do alto-forno é o gusa, impuro, com alto teor de carbono. Se deixado solidificar em moldes (ou primitivamente em leitos de areia) forma os pães de gusa que são refundidos em fornos menores, chamados fornos de Cubilot, com cerca de 6 m de altura, onde sofre a nova fundição, refinando-se mais (ARAÚJO, 2011).

Para Mourão e Gentile (2011) as usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo o aço é obtido a partir de ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro na própria usina, nos altos-fornos; o produto dos altos fornos-fornos, chamado ferro-gusa, é transformado em aço através da operação de conversão.

O mesmo autor ainda apresenta que as matérias-primas do processo são minério de ferro, carvão mineral e calcário, mas muitos outros insumos e utilidades são empregados.

Segundo Silva e Mei (2010) o ferro-gusa é obtido pelo seguinte processo: são carregados, alternadamente, em camadas, pelo topo: minério de ferro (e/ou pelotas ou sinter), coque (combustível e redutor) e fundente (calcário e/ou dolomita). Por meio de penetrações na parte inferior do forno, chamadas “ventaneiras”, ar quente e/ou enriquecido com oxigênio é injetado. Em altos-fornos modernos, carvão pulverizado (e, eventualmente, óleo ou gás combustível) pode também ser injetado pelas ventaneiras para complementar as necessidades de combustível redutor. O ar

soprador pelas ventaneiras queima parte do coque e combustível injetado, para fornecer calor às reações químicas e para fusão do ferro, enquanto o resto do coque e parte do produto da queima removem o oxigênio combinado com o metal nas reações de redução. Quando da ocorrência da redução do minério, o metal líquido goteja e é coletado no cadinho no fundo do forno.

Para Pfeil (2014) o principal processo de fabricação do aço consiste na produção de ferro fundido no alto-forno e posterior refinamento em aço no conversor de oxigênio. O outro processo utilizado consiste em fundir sucata de ferro em forno elétrico cuja energia é fornecida por arcos voltaicos entre o ferro fundido e os eletrodos. Os metais ferrosos são obtidos por redução dos minérios de ferro nos altos-fornos.

Pela parte superior do alto-forno, são carregados minério, calcário e coque. Pela parte inferior do forno, insufla-se ar quente. O coque queima produzindo calor e monóxido de carbono, que reduzem o óxido de ferro a ferro liquefeito, com excesso de carbono. O calcário converte o pó do coque e a ganga (minerais terrosos do minério) em escória fundida (PFEIL, 2014).

Pela parte inferior do forno são drenadas periodicamente a liga ferro-carbono e a escória. O forno funciona continuamente. O produto de alto-forno chama-se ferro fundido ou gusa. É uma liga de ferro com alto teor de carbono e diversas impurezas. Uma pequena parte da gusa é refundida para se obter ferro fundido comercial. Porém, a maior parte é transformada em aço através dos conversores de oxigênio. O refinamento do ferro fundido em aço é feito no conversor de oxigênio e consiste em remover o excesso de carbono e reduzir a quantidade de impurezas a limites prefixados (PFEIL, 2014).

A aciaria é o setor da usina siderúrgica onde o gusa é refinado obtendo-se o aço. O processo consagrado nas usinas integradas, atualmente, é a conversão do gusa pelo processo a oxigênio, ou processo Linz-Donawitz (LD), no qual o gusa é oxidado, controladamente, por um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho, através de uma lança, por onde o fluxo de oxigênio atinge velocidade acima da do som (MOURÃO; GENTILE, 2011).

Ainda segundo os mesmos autores, nas aciarias é que se encontram os processos mais flexíveis na arte de se conseguir aços com qualidades competitivas com aquelas de aços fabricados por aciarias de pequeno porte, que utilizam sucata e fornos elétricos a arco.

Para Pfeil (2014), o conversor de oxigênio baseia-se na injeção de oxigênio dentro da massa líquida de ferro fundido. O ar injetado queima o carbono na forma de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), em um processo que dura de 15 a 20 minutos.

Ainda segundo o mesmo autor, elementos como manganês, silício e fósforo são oxidados e combinados com cal e óxido de ferro, formando a escória que sobrenada o aço liquefeito. O aço líquido é analisado, podendo modificar-se a mistura até se obter a composição desejada. Desse modo, obtém-se aço de qualidade uniforme. Quando as reações estão acabadas, o produto é lançado numa panela e a escória é descarregada em outro recipiente.

O aço pode ser obtido diretamente do minério, no estado sólido pela redução direta, que produz o ferro-esponja, ou descarbonetando-se o gusa líquido, através do sopro de oxigênio (processo LD), ou ainda, refundindo-se a sucata juntamente com gusa sólido em fornos elétricos a seco (ARAÚJO, 2011).

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação de aço pelo sistema LD são o gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido, minério de ferro, cal, fluorita e oxigênio (MALYNOWSKYJ, 2011).

A produção brasileira de aço bruto alcançou 8,6 milhões de toneladas no primeiro trimestre de 2018, o que representa uma elevação de 4,9% frente ao mesmo período do ano anterior. A produção de laminados no mesmo período foi de 5,8 milhões, aumento de 7,3% em relação a 2017. A produção de semiacabados para vendas totalizou 2,3 milhões de toneladas no acumulado de 2018, um aumento de 2,9% na mesma base de comparação (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

4.3 Aciarias LD – breve histórico

Colpaert (2008) cita que, por volta do meio século XIX, Sir Henry Bessemer desenvolveu e patenteou um processo para “converter” o gusa em aço, através da insuflação de ar, sob pressão no gusa líquido. Na mesma época, Willian Siemens, na Inglaterra, desenvolveu um forno que aproveitava, através de trocadores de calor estáticos, chamados regeneradores, o calor dos gases de combustão e permitia pré-aquecer o ar usado na combustão. O advento da produção do oxigênio em escala industrial e o aumento do custo dos combustíveis empregados nos fornos *Siemens-*

Martin condenaram-nos ao desaparecimento quase que completo no final da década de 1970.

Malynowskyj (2011) menciona que foi em 1952 o aparecimento do conversor a oxigênio, ou LD. Esse processo permitiu fabricar aço com menor investimento de capital e com uma produtividade maior que nos fornos *Siemens - Martin*. Os primeiros experimentos foram instalados em conversores de 15t na usina de Linz e de 10t na usina de Donawitz, na Áustria. Os primeiros resultados se mostraram satisfatórios, sendo então construídas duas aciarias nessas cidades: a de *Linz* entrou em operação em novembro de 1952 e a de Donawitz, em maio de 1953. Somente em 1954 entrou em operação a primeira Aciaria LD (de Linz e Donawitz) fora da Áustria, na usina da Dominion Foundries, em Hamilton, Canadá.

O autor supracitado ainda apresenta que o processo LD foi rapidamente introduzido no Brasil, por meio da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, cuja aciaria da usina de Monlevade entrou em funcionamento em 1957, menos de 5 anos após a de Linz. Em 1963 iniciaram a sua operação as usinas da Siderúrgica Mannesman, em Belo Horizonte, e Intendente Câmara, da Usiminas, em Ipatinga. Logo em seguida, entrou em operação a Aciaria LD da Cosipa, em 1965.

Silva e Mei (2010) afirmam que, no início do século XXI, os conversores pneumáticos representaram cerca de 65% da produção mundial do aço e classifica os principais tipos de conversores em:

- LD ou BOF (Linz-Donawitz ou *Basic Oxygen Furnace*), com sopro por cima.
- Q-BOP (*Quick-Basic Oxygen Process*), com sopro submerso, por baixo.
- Processos de sopros combinados ou sopro misto.

4.3.1 Geração das escórias de aciarias

A norma NBR 5019 (ABNT, 2001) define a escória de aciaria como um produto líquido ou pastoso produzido durante operações pirometalúrgicas, geralmente contendo sílica, que se torna sólido a temperatura ambiente. As escórias são os resíduos de maior geração no processo siderúrgico.

Para Bolota (2011) a escória é uma fase normalmente líquida composta principalmente de óxidos e que sobrenada o aço líquido devido a diferença de densidade entre as duas fases.

Bolota (2011) ainda relata que a formação da escória no processo de fusão é resultado da oxidação do aço e seus elementos de liga, oxidação está causada pelo contato com o oxigênio injetado ou presente no ar.

A escória é um resíduo inerente à produção do aço, sendo que se apresenta nas formas de escória de alto-forno, escória LD e escória de aciaria elétrica (forno elétrico a arco e forno panela), possuindo características bem distintas umas das outras (POLISSENI, 2005).

Os dois processos mais utilizados para produção de aço no Brasil e no mundo se dão através da fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco (aciarias elétricas) e através do refino do ferro-gusa líquido em convertedores à oxigênio (aciarias LD – Linz e Donawitz) (GEYER, 2001).

No Brasil, para cada tonelada de aço produzido em usinas integradas, cerca de 400 a 500 kg de escória são geradas. Aproximadamente, 300 a 350 kg são provenientes de escórias de alto-forno e 100 a 150 kg correspondem às escórias de aciaria LD (CRUZ et al., 1999 apud GUMIERI, 2012).

A Usina Presidente Vargas em Volta Redonda – RJ, atual Companhia Siderúrgica Nacional, possui 2 altos-fornos com capacidade de geração anual ao redor de 1,6 Mt (Um milhão e seiscentas mil toneladas) de escória granulada de alto-forno e de 0,6 Mt (Seiscentas mil toneladas) de escória de aciaria LD (SILVA et al., 2015).

Para Silva (2011), para cada tonelada de gusa produzido, em torno de 600 a 700 kg de escória de alto-forno são gerados, e para cada tonelada de aço líquido processado, 100 a 150 kg de escória de aciaria são formados.

4.3.2 Composição química da escória de aciaria LD e suas propriedades físicas

As escórias de aciaria LD são formadas predominantemente por óxidos de cálcio, silício e ferro. Mas sua composição varia em função do tipo de forno, das matérias-primas utilizadas e tipo de aço fabricado (MOURA, 2000).

Polisseni (2005) cita que a composição química da escória de aciaria é semelhante à encontrada no cimento Portland (silício, alumínio, ferro, cálcio, entre

outros), porém a quantidade dos óxidos formados por estes elementos químicos difere substancialmente.

Quanto às escórias de aciaria LD, Polisseni (2005) relata ainda que consistem basicamente de CaO, MgO, SiO₂ e Al₂O₃, óxidos de ferro e traços de outros elementos químicos. E a geração da escória de aciaria é inerente ao processo de produção do aço e se apresenta de duas formas: escória de refino oxidante e escória de refino redutor.

Bolota (2011) descreve que, para o completo entendimento dos processos de refino secundário do aço, é importante que seja entendido que os elementos químicos presentes no aço líquido estão em permanente equilíbrio com os compostos presentes na escória, ou nas inclusões presentes no aço.

SILVA et al., (2015) apresenta a composição química da escória de aciaria LD e de alto-forno (TAB. 10).

Tabela 10 - Composição química das escórias de aciaria LD e escórias de alto-forno.

Escória de Aciaria LD									
Composição Química	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Basicidade Binária	FeO	MnO	P ₂ O ₃	S
Valor Médio	1,08	12,55	44,34	11,5	3,77	25,74	4,29	3,16	0,05
Desvio Padrão	0,35	1,77	2,4	1,76	0,6	4,18	0,59	0,97	0,02

Escória de Alto-Forno									
Composição Química	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Basicidade Binária	Fe	TiO ₂	S	
Valor Médio	13,18	36,4	41,79	4,75	1,15	0,18	0,51	0,34	
Desvio Padrão	0,88	1,34	1,75	0,42	0,77	0,06	0,16	0,13	

Fonte: SILVA et al. (2015).

Há que se considerar, na utilização da escória de aciaria, o fenômeno da expansão que a mesma apresenta devido ao teor de óxidos de cálcio e magnésio livres. Estes óxidos, ao hidratarem, formam compostos expansivos (MOURA, 2000).

Gumieri (2002) relata que o fenômeno da expansibilidade das escórias de aciaria é provocado pela hidratação do óxido de cálcio livre e do óxido de magnésio não-reagido. Em presença de umidade, estes óxidos hidratam, aumentando de volume.

4.3.3 Aplicações da escória de aciaria LD

Polisseni (2005) cita que as oportunidades de utilização da escória de aciaria são:

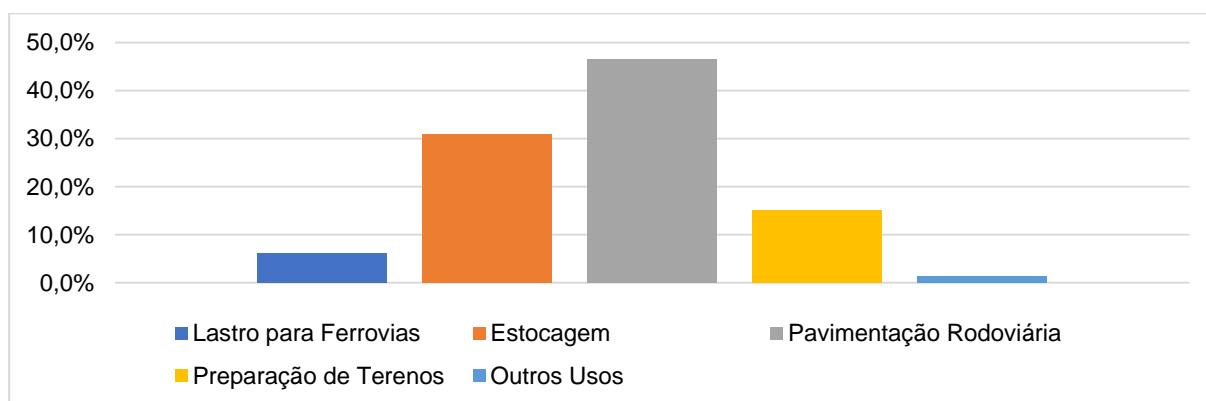
- Em obras rodoviárias e lastros ferroviários;
- Na produção do cimento;
- Em concretos e argamassas como substituição ou adição ao cimento;
- Como agregado;
- Como fertilizante e corretivo do solo.

Silva, J. (2011) também apresenta alguns dos principais usos das escórias siderúrgicas e suas principais limitações tecnológicas para uso da escória de alto-forno e aciaria, a saber:

- Escória de aciaria a oxigênio: pavimentação, lastro de ferrovia, artefatos de concretos, gabiões, drenagens, fertilizantes e corretivos do solo. A principal limitação tecnológica de uso é a expansão volumétrica.
- Escória de alto-forno: matéria prima para produção industrial (cimento, lã mineral, industrial de vidro), corretivo de solo, asfalto, aterros, lastro ferroviário e bases de estradas. A principal limitação tecnológica do seu uso é a necessidade de granulação.

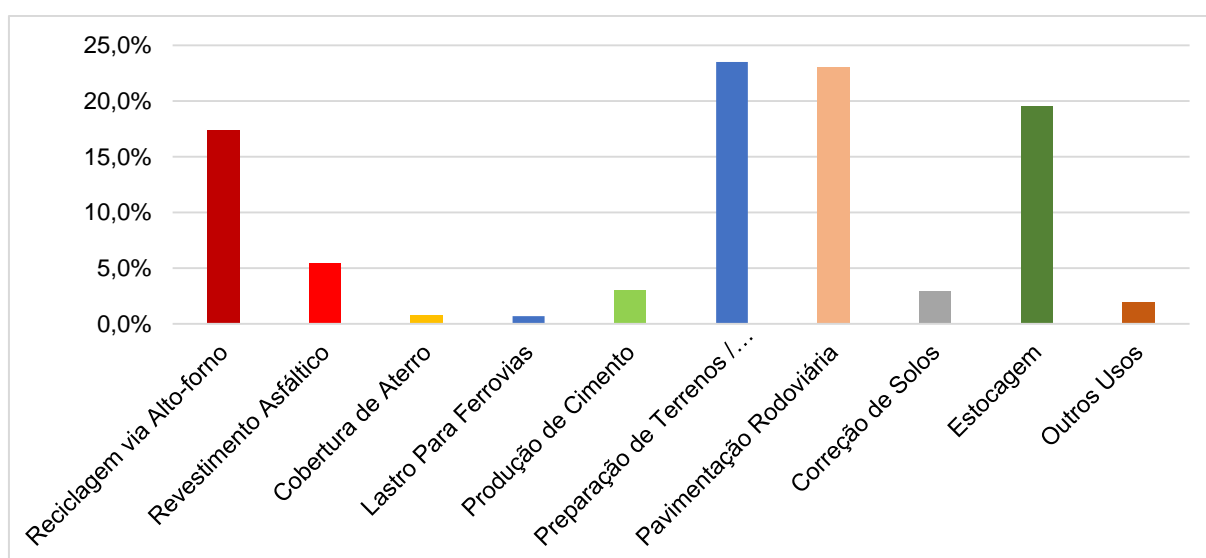
No Brasil, há poucas referências com relação à aplicação da escória de aciaria LD na fabricação de cimento. Todavia, em outros países, cerca de 3% da geração das escórias de aciaria são empregados na fabricação do cimento Portland, conforme dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS (2004), que apresentam as principais aplicações da escória de aciaria no Brasil (GRAF.1), bem como a comparação da aplicação do mesmo produto em demais países, mostrada no GRAF. 2 (SILVA et al., 2015).

Gráfico 1- Aplicação da escória de aciaria no Brasil.



Fonte: IBS, (2004) apud SILVA et al. (2015).

Gráfico 2 - Aplicação da escória de aciaria nos demais países.



Fonte: IBS, (2004) apud SILVA et al., (2015).

Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia do Sul já utilizaram escórias de aciaria em sub-bases, bases e pavimentação asfáltica como alternativa a agregados naturais como brita e área de rio (POLISSENI, 2005).

No Brasil, os índices de aproveitamento da escória de aciaria ainda são baixos, considerando-se que mais da metade do volume total de escórias de aciarias geradas são estocadas nos pátios siderúrgicos, não tendo aplicação definida (IBS, 1998 apud Gumieri 2002).

4.3.4 Passivos ambientais gerados pela escória de aciaria LD

A região sudeste do Brasil é responsável por aproximadamente 95% da produção brasileira de aço bruto. A grande maioria das siderurgias localizam-se próximas dos centros urbanos, e com isso, a demanda por áreas de estocagem das escórias geradas na região é crescente, contribuindo para o aumento das áreas degradadas e, conseqüentemente, do impacto ambiental (GUMIERI, 2002).

Uma das maiores conseqüências da produção do aço bruto em escala mundial é o crescente consumo de recursos naturais renováveis e não renováveis (minérios, carvão, calcários, dolomitas, água, gases industriais, óleos e lubrificantes, entre outros), energia, sucatas e a geração de resíduos industriais, principalmente: escórias, lamas, carepas, emissão de materiais particulados e gás carbônico (SILVA, J., 2011)

Ainda de acordo com o autor supracitado, do ponto de vista ambiental, cada operação dentro de uma usina siderúrgica está associada ao consumo de matérias-primas, insumos e energia, gerando por sua vez resíduos sólidos, líquidos e gasosos, conforme (QUADRO 1).

Quadro 1 - Resíduos sólidos e impactos ambientais da produção de aço.

Setores	Produtos	Resíduos (Sólidos, Líquidos e/ou Gasosos).
Coqueria	Coque	Gases (NO _x / VOC's) dioxinas, metano, benzeno, fenóis, compostos alifáticos, amônia, naftalenos.
Sinterizações	Sínter	Material particulado, dioxinas, gases (CO, CO ₂ / SO ₂ / NO _x / VOC's).
Altos-fornos	Gusa líquido	Fenóis, cianetos, amônia, sulfetos, gases (CO, CO ₂ / NO _x)
Dessulfurações	Gusa dessulfurado	Material particulado, escórias
Calcinações	Cales, dolomitas calcinadas	Material particulado, CO ₂)
Aciaria LD Refino Primário	Aço líquido	Material particulado, Metais (Zn), gases (CO, CO ₂ / NO _x), metais solúveis, material sedimentável, escórias e refratários.
Refino Secundário	Aço líquido (tratado)	Gases (CO, CO ₂), material particulado, sucata, escórias, refratários.
Lingotamento contínuo	Placas / Tarugos ou lingotes de aço	Sucata, material particulado, sólidos suspensos, óleos.
Laminações	Chapas, bobinas, tiras	Óleos, soluções ácidas, sucatas, gases (CO, CO ₂ / SO ₂ / NO _x / VOC's) material sedimentável, metais solúveis.

Fonte: SILVA, J., (2011, p. 382).

5 MATERIAL E METÓDOS

O trabalho foi realizado em uma indústria cimenteira situada no município de Arcos, no centro-oeste de Minas Gerais. A empresa possui uma mina de rochas de calcário dolomítico da qual é explorada a matéria prima para o cimento. A planta para a produção de cimento conta com dois fornos, sendo um com capacidade de 2500 toneladas/dia e outro com capacidade de 6500 toneladas/dia, mais duas moagens de cimento com capacidade de produção de 161 toneladas/hora. Atualmente a cimenteira produz 9000 toneladas de clínquer/dia e é expedido, entre cimento ensacado e a granel, cerca de 7500 toneladas/dia.

5.1 Obtenção das matérias primas

As amostras de escória de aciaria (LD) e escória de alto-forno utilizadas no presente trabalho tiveram como origem uma siderúrgica situada em Volta Redonda, Rio de Janeiro, onde é produzido o aço para diversos tipos de seguimentos. O transporte das escórias até Arcos – MG foi feito através de caminhões / carretas. Quanto às demais matérias primas, o clínquer foi produzido na própria unidade, o gesso foi adquirido através de fornecedores de diversos estados brasileiros e o calcário foi explorado na própria mina da cimenteira.

5.2 Preparação da Escória de Aciaria (LD) para adição na produção do cimento Portland

Foi coletada uma amostra constituída de material extraído de 10 pontos diferentes do estoque, totalizando 10 kg de amostra. Em seguida, realizou-se o quarteamento da amostra até sua redução para 1kg.

Em seguida, foi feita a secagem da amostra quarteada em estufa a uma temperatura de 100°C por um período de duas horas. Após esta etapa, foi feita a moagem do material dentro do pulverizador de painelas por 120 segundos, deixando a escória de aciaria nas condições apropriadas para a sua adição da produção do cimento Portland.

5.3 Produção do cimento em laboratório

Após a obtenção e preparação das matérias-primas, foram criadas doze formulações para a produção do cimento Portland CP II E 32 com adição de escória de aciaria (LD), conforme mostra a TAB. 11. Quanto às adições, foram observados os limites citados na TAB.9 no item 5.2.1 do referencial teórico do presente trabalho.

Tabela 11- Formulações base das amostras de 1 a 12.

FORMULAÇÃO BASE					
Formulações	Escória de aciaria	Escória alto-forno	Clínquer	Gesso	Calcário
1	0%	25,00%	61,50%	3,50%	10,00%
2	3,50%	21,50%	61,50%	3,50%	10,00%
3	5,00%	20,00%	61,50%	3,50%	10,00%
4	8,00%	17,00%	61,50%	3,50%	10,00%
5	10,00%	15,00%	61,50%	3,50%	10,00%
6	12,00%	13,00%	61,50%	3,50%	10,00%
7	10,00%	15,00%	61,50%	3,50%	10,00%
8	10,00%	16,00%	60,50%	3,50%	10,00%
9	10,00%	17,00%	59,50%	3,50%	10,00%
10	10,00%	18,00%	58,50%	3,50%	10,00%
11	10,00%	19,00%	57,50%	3,50%	10,00%
12	10,00%	20,00%	56,50%	3,50%	10,00%

Fonte: Autor (2018).

A moagem das matérias-primas foi realizada em moinho piloto de laboratório (Moinho de corpos moedores), da marca Le Keda Machinery, que possui uma potência de 16 cv e um total de 100 kg de corpos moedores. Foi estipulada, para a moagem das matérias-primas, uma massa total de aproximadamente 8 kg para cada formulação.

Antes de iniciar a moagem, todas as matérias-primas passaram por um processo de secagem, onde permaneceu por 24 horas em uma estufa a temperatura de 100°C. Após a secagem, as matérias-primas foram pesadas conforme formulações definidas na TAB. 11 (porcentagens em massa) e, posteriormente cada formulação foi pré-homogeneizada em sacos plásticos.

Para verificar a eficiência da moagem, foi estipulada uma área específica (Blaine) que ficasse entre 4600 g/cm² a 4700 g/cm². A cada 30 minutos de moagem, era realizado o ensaio através do permeabilímetro de Blaine, para determinar a área específica até a atingir o valor estabelecido.

Todos os ensaios de área específica foram realizados através de um permeabilímetro de blaine manual, marca Solotest, e para a pesagem das amostras a serem ensaiadas, foi utilizada uma balança analítica da marca, Sartorius.

5.4 Análise dos requisitos químicos do cimento Portland CP II E 32

Para atender às especificações dos requisitos químicos, foi utilizada a TAB.2 descrita no item 4.1.2 do referencial teórico. A forma como foram realizados os ensaios de determinação dos parâmetros químicos do cimento produzido pelas formulações da TAB.11 estão descritos a seguir.

5.4.1 Determinação do Resíduo Insolúvel (RI) – ABNT NBR NM 15:2004

O resíduo insolúvel é a porção do cimento que não é solúvel ao ataque de ácido clorídrico (esse valor indica a quantidade de componentes não hidráulicos presentes no cimento). Quanto ao procedimento de determinação desse parâmetro, cumpriram-se as determinações da NM 15:2004.

A porcentagem de resíduo insolúvel é dada pela Equação 1:

$$RI = \left(\frac{m_2 - m_1 - m_3}{m} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

R I = percentual de resíduo insolúvel, em %;

m = é a massa da amostra, em g;

m₁ = é a massa do cadinho, em g;

m₂ = é a massa do cadinho mais a massa do resíduo insolúvel, em g;

m₃ = é a massa do resíduo devido ao ensaio em branco, quando realizado, em g.

5.4.2 Determinação de perda ao fogo – ABNT NBR NM 18:2012

O procedimento para a determinação desse parâmetro consistiu em pesar 1,0000 ± 0,0010 g de material em um cadinho de platina previamente calcinado por 15 minutos a 1000°C e tarado em uma balança analítica; logo após o cadinho junto com a amostra foi levado a um Forno Mufla da marca JUNG e calcinado por aproximadamente 1 hora. Após este processo de calcinação, a amostra foi resfriada em dessecador.

A porcentagem de perda ao fogo é determinada pela Equação 2:

$$PF = \frac{(m_2 - m_1)}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

m = massa da amostra utilizada no ensaio (g)

m₁ = massa do cadinho mais a amostra a ser ensaiada (g)

m₂ = massa do cadinho mais a amostra a ser ensaiada após a calcinação (g).

5.4.3 Trióxido de enxofre (SO₃) - ABNT NBR NM 16:2012

As análises de trióxido de enxofre (SO₃), também denominado anidrido sulfúrico ou óxido sulfúrico, foram realizadas em um forno de indução da fabricante LECO, modelo SC-144 DR, que opera com a absorção de infravermelho.

5.5 Ensaio para a verificação das exigências físicas e mecânicas

Após o desenvolvimento das doze amostras de cimento, elas passaram por análises para verificar o atendimento às exigências físicas e mecânicas como: finura (resíduo na peneira de 75µm) conforme NBR 11579 (ABNT, 2012), tempo de pega conforme NBR 16607 (ABNT, 2017), expansibilidade a quente conforme NBR 11582 (ABNT, 2016). Quanto às exigências de resistência à compressão, foram cumpridas as determinações da NBR 7215 (ABNT, 1997). Foram observados os parâmetros apresentados na TAB.12 a seguir.

Tabela 12- Exigências físicas e mecânicas do CP II E 32

Características e propriedades		Unidade	Limites
	Finura (resíduo na peneira 75 µm)	%	≤ 12,0
	Tempo de início de pega	min	≥ 60
	Expansibilidade a quente	mm	≤ 5,0
Resistência à compressão	1 dia	MPa	-
	3 dias	MPa	≥ 10,0
	7 dias	MPa	≥ 20,0
	28 dias	MPa	≥ 32,0

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

5.5.1 Determinação do índice de Finura por peneirador dinâmico – ABNT NBR 11579:2012

Para realizar o ensaio, inicialmente acoplou-se a peneira no peneirador aerodinâmico da marca Metal Cairo e logo após pesou-se, em uma balança eletrônica da marca Shimadzu, 10 gramas da amostra a ser ensaiada e adicionada na peneira. O peneirador aerodinâmico foi ajustado para um vácuo de 200 mm/H₂O e foi estabelecido um tempo de 3 minutos de peneiramento. O índice de finura do cimento é dado pela Equação 3:

$$F = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

F= índice de finura do cimento, em %;

RC= resíduo do cimento na peneira de 75 µm, em g;

M= massa inicial do cimento, em g.

5.5.2 Tempo de início de pega – NBR 16607 (ABNT, 2017)

Utilizou-se um aparelho de Vicat automático da marca Toni Technik, que faz a leitura do tempo de início de pega da pasta e, através de um *software*, demonstra através de gráfico o estado da pasta de cimento, e, ao final demonstra o resultado em minutos.

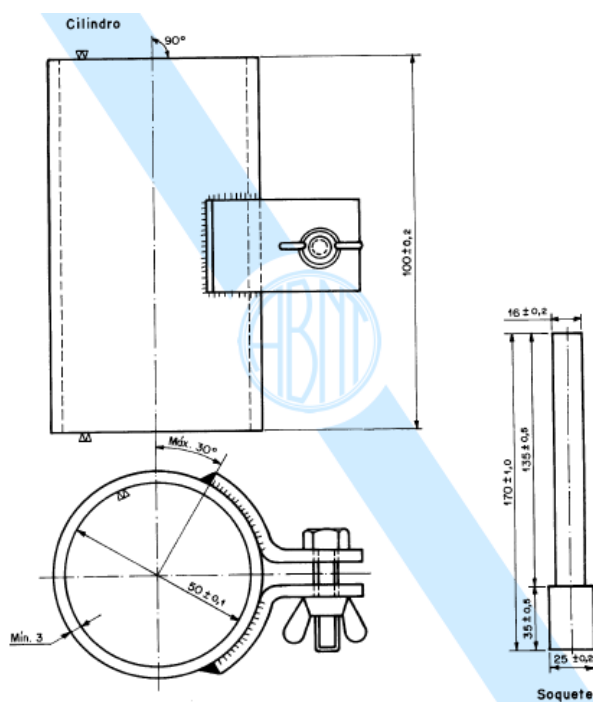
5.5.3 Expansibilidade a quente – NBR 11582 (ABNT, 2016)

Foram confeccionados três corpos-de-prova para cada formulação de cimento criada em laboratório e os mesmos foram curados em câmara úmida da marca Ethik. Para o aquecimento, foi utilizado um aparelho de banho-maria, da marca QUIMIS. O resultado se dá pela média da medição do três corpos-de-prova.

5.5.4 Ensaio para verificação da resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 1997)

O método compreende a determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e de 100 mm de altura (FIG.1).

Figura 1 - Medidas geométricas para molde e soquete



Fonte: NBR 7215 (ABNT, 1997).

Os corpos-de-prova foram elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento, três partes de areia normalizada em massa (TAB.13) e com relação água/cimento de 0,48.

Tabela 13 – Quantidade de material utilizado

Material	Massa para mistura g
Cimento Portland	624 ±0,4
Água	300±0,2
Areia normal	
fração grossa	468 ± 0,3
fração média grossa	468 ± 0,3
fração média fina	468 ± 0,3
fração fina	468 ± 0,3

Fonte: Tabela A.2 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

A argamassa foi preparada por meio de um misturador mecânico (FIG.2), respeitando as velocidades conforme TAB.14 e compactada manualmente em um molde, por um procedimento normalizado (FIG.3). Os moldes onde se moldaram os corpos-de-prova foram conservados em atmosfera úmida para cura inicial (FIG.4); em seguida, os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada de cal até a data de ruptura, respeitando a tolerância de tempo descrita na TAB.15.

Figura 2 - Misturador Mecânico



Fonte: Autor (2018).

Tabela 14 - Velocidade da pá do misturador

Velocidade	Rotação em torno do eixo rpm	Movimento planetário rpm.
Baixa	140 ± 5	62 ± 5
Alta	285 ± 10	125 ±10

Fonte: Tabela A-1 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Figura 3 - Soquete utilizado no ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 4 - Câmara úmida.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 13 - Tolerância de tempo para a ruptura.

Idade de Ruptura	Tolerância
24 h	± 30 min
3 dias	± 1h
7 dias	± 2h
28 dias	± 4h
91 dias	± 1 dia

Fonte: Tabela A-3 da NBR 7215 (ABNT, 1997)

Nas datas previstas, relativas à as idades de cura 3 dias (R3), 7 dias (R7) e 28 dias (R28), os corpos-de-prova foram retirados do meio de conservação e capeados com mistura de enxofre, de acordo com o procedimento normalizado. Quanto às determinações das resistências mínimas à compressão, foram observadas as recomendações mínimas descritas nas TAB. 4 e 5.

A resistência à compressão foi determinada conforme metodologia descrita na NBR 7215 (ABNT, 1997) e foi utilizada uma prensa da marca Toni Technik, modelo 2020 com uma carga contínua e velocidade constante.

5.6 Análise de dados

De posse dos dados obtidos dos ensaios de caracterização química, física e mecânica das formulações testadas para a produção do cimento CP II E 32 com adição de escória de aciaria do processo LD, os mesmos foram processados, tabulados, ilustrados em gráficos de barra sendo confrontados entre si e com as exigências estabelecidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados e discussão das análises químicas, físicas e mecânicas das doze amostras do cimento Portland do tipo CP II E 32 criadas em laboratório conforme as doze formulações estabelecidas para a adição de escória de aciaria LD.

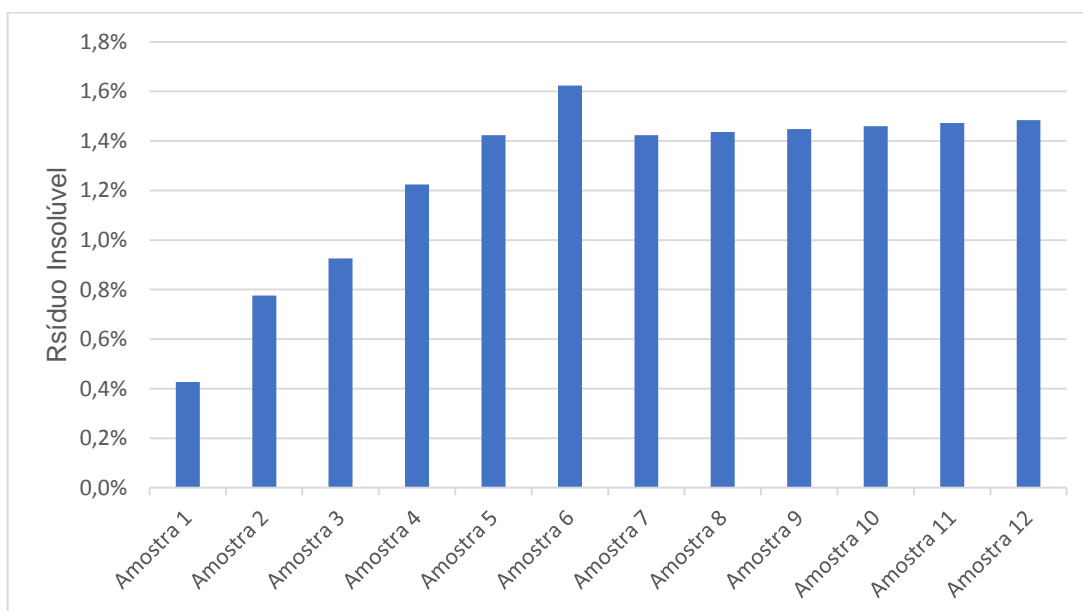
6.1 Resultados das análises químicas

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros químicos analisados: resíduo insolúvel, perda ao fogo e trióxido de enxofre, juntamente com as discussões técnicas.

6.1.1 Determinação do resíduo insolúvel

São mostrados no GRAF.3 os resultados obtidos para o resíduo insolúvel das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 3 -Resíduo insolúvel das 12 formulações de cimento avaliadas.



Fonte: Autor (2018).

O resíduo insolúvel (RI) das doze amostras atendeu à determinação da TAB. 2 apresentada no item 4.1.2 do referencial teórico, em que é fixado a um valor

$\leq 5,0\%$. Com a adição de até 5% de escória de aciaria (LD), os valores de RI das amostras se comportaram abaixo de 1% (amostras 1 e 3). As amostras que tiveram adições de 8% a 10% de escória de aciaria (LD) apresentaram resultados que variaram de 1,4% a 1,5% (amostras 4,5,7,8,9,10,11 e 12). A amostra 6, com adição de 12% de escória de aciaria (LD), foi a que apresentou um resultado mais expressivo: 1,6%, todavia, ainda está dentro do permitido.

A média para as doze amostras está na faixa de 1,3% de resíduo insolúvel. O desvio padrão para as doze amostras apresentou valor de 0,4% e um coeficiente de variação de 28,6%.

Na TAB. 16 podem ser visualizadas as formulações bases com adição de escória de aciaria (LD) testadas por Silva et al., (2015) para o cimento tipo CP III E 32, onde o resíduo insolúvel foi de 5,33% superando, na época dos experimentos, o permitido na NBR 11578 (ABNT, 1991) que fixava um valor $\leq 2,5\%$. A atual NBR 16697 (ABNT, 2018) fixa um valor de $\leq 5,0\%$. Para ambas as classes, CP II ou CP III, o parâmetro de resíduo insolúvel é o mesmo.

Tabela 14 - Formulações base com Adição de Escória de Aciaria (LD)

Formulações base (%)					
Formulações	Escória de Aciaria (LD)	Escória de Alto-Forno	Clínquer	Calcário	Gesso
1	5	63	30	0	2
2	8	61	29	0	2
3	10	60	28	0	2
4	10	58	30	0	2

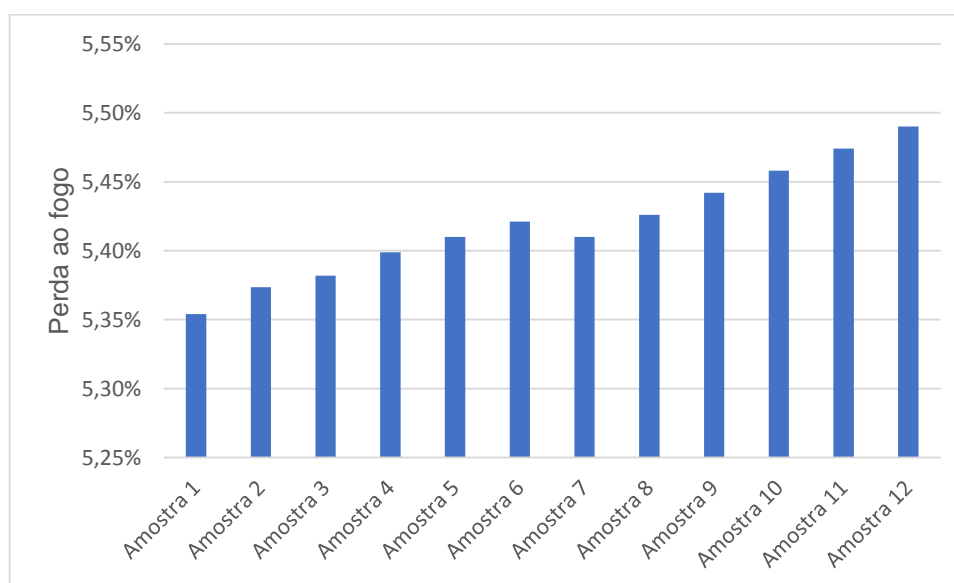
Fonte: Silva et al., (2015).

Nesse trabalho, os valores de RI foram diretamente proporcionais aos percentuais de escória de aciaria (LD) adicionados à produção do cimento. Logo, constata-se que, para formulações com adições superiores de escória de aciaria (LD) às indicadas na TAB.11, os valores de RI tenderam a superar o valor permitido de resíduo insolúvel atual, que é de $\leq 5,0\%$.

6.1.2 Determinação de perda ao fogo

São mostradas no GRÁF.4 os resultados obtidos para perda ao fogo das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 4 - Perda ao fogo das 12 formulações de cimento avaliadas.



Fonte: Autor (2018).

A perda ao fogo das doze amostras atendeu à determinação da TAB. 2 apresentada no item 4.1.2 do referencial teórico, em que é fixado a um valor $\leq 8,5$. Com adições que variaram de 0% a 12% de escória de aciaria (LD), a média obtida para esse parâmetro foi de 5,4%, apresentando um desvio padrão de 0,04% e um coeficiente de variação de 0,8%.

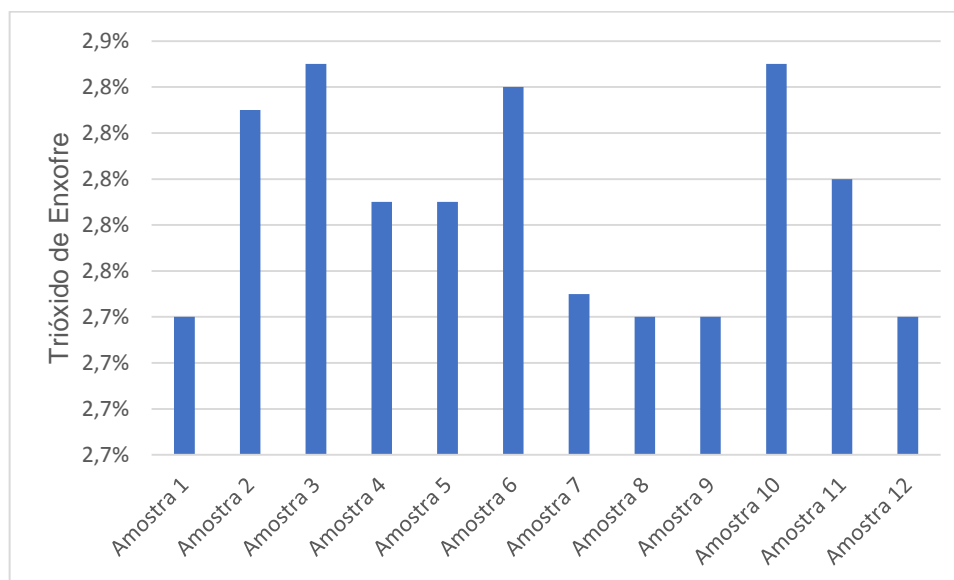
Comparando os testes atuais com os realizados por SILVA et al. (2015), nas formulações descritas na TAB.16 obteve-se um resultado de 0,63% que também atendeu à atual NBR 16697 (ABNT, 2018).

As variações observadas para a perda ao fogo das amostras não podem ser relacionadas unicamente à adição da escória de aciaria (LD) à produção do cimento, pois, nas amostras de 7 a 12, as concentrações de escória de aciaria (LD) são constantes e a perda ao fogo foi crescente. Logo, esse parâmetro foi diretamente proporcional às quantidades de escória de alto-forno presentes na amostra, indicando que para adições superiores de escória de alto-forno acima das indicadas na TAB.11, os valores de perda ao fogo tenderão a ultrapassar o valor permitido para este parâmetro.

6.1.3 Trióxido de enxofre

São mostrados no GRÁF.5 os resultados obtidos para a porcentagem de trióxido de enxofre das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 5 - Trióxido de Enxofre (SO₃) das 12 formulações avaliadas.



Fonte: Autor (2018).

A presença do trióxido de enxofre (SO₃) nas doze amostras atenderam à determinação da TAB. 2 apresentada no item 4.1.2 do referencial teórico, em que é fixado a um valor $\leq 4,5\%$. A média da porcentagem do SO₃ apresentou valor de 2,79%, sendo que o desvio padrão apresentado foi de 0,05% e seu coeficiente de variação foi de 1,6%.

Tiveram valores mais expressivos as amostras 3, 6 e 10, chegando a 2,85%. Este valor se deu em função do aumento da adição de escória de aciaria (LD), que ficou na média de 9%, e também pelo aumento da adição de escória de alto-forno, que apresentou média de 17%.

Percebeu-se que quanto maior a adição de escória de aciaria (LD) em conjunto com a escória de alto-forno, maiores foram as porcentagens de trióxido de enxofre (SO₃).

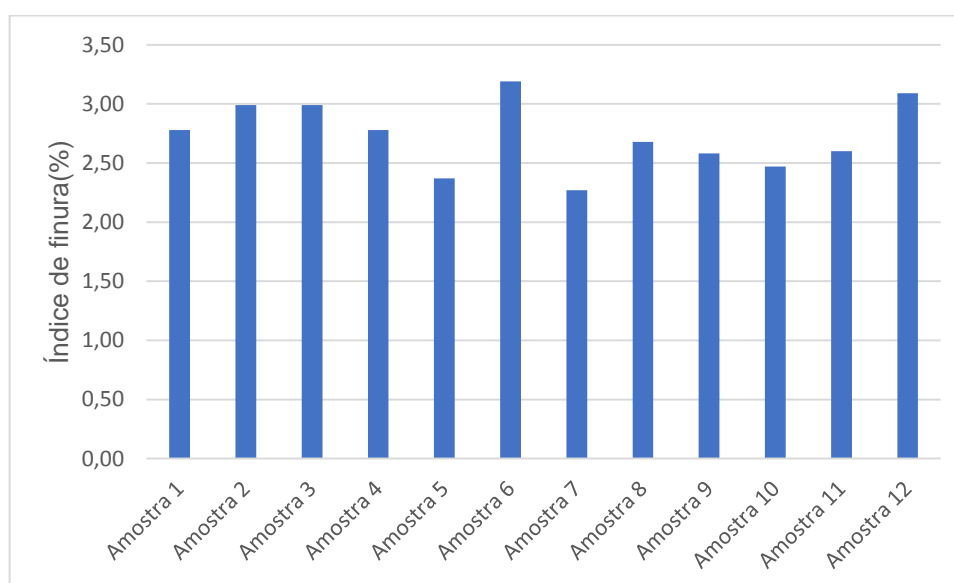
6.2 Resultados das análises físicas e mecânicas

Neste item são apresentados os resultados das análises físicas e mecânicas das amostras (formulações) analisadas: índice e finura, tempo do início de pega, expansibilidade a quente e resistências à compressão, juntamente com suas discussões técnicas.

6.2.1 Índice de finura por amostra

São mostrados no GRÁF.6 os resultados obtidos para índice de finura das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 6 - Índice de finura das 12 formulações avaliadas.



Fonte: Autor (2018).

O índice de finura (% em massa de cimento cujas dimensões são superiores a 75 μm - fração retida na peneira) das doze amostras atendeu às determinações descritas no item 4.1.2 (TAB. 4) do referencial teórico, onde a tabela fixa um valor $\leq 12,0\%$ para esse parâmetro.

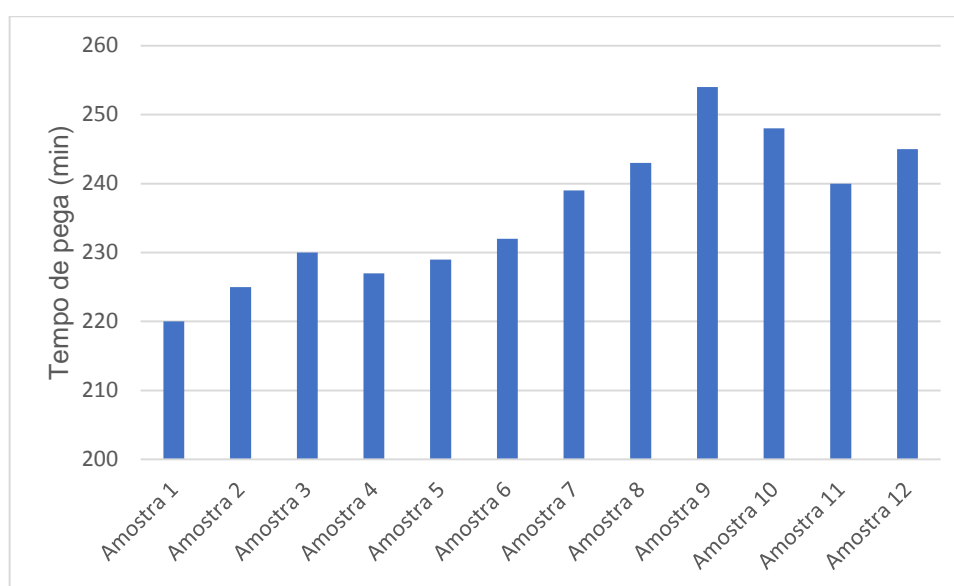
De forma geral, a média do índice de finura das amostras foi de 2,73 μ , o desvio padrão das amostras foi de 0,29 μ e coeficiente de variação foi de 10,7%. Os maiores valores de índice de finura foram observados para as amostras 6 e 12, com média de 3,14%, o que é função do aumento da adição de escória de aciaria (LD),

que ficou na média de 11%, em conjunto à adição de escória de alto-forno, que foi em média de 16,5%. As demais amostras tiveram média de índice de finura de 2,65%.

6.2.2 Tempo de início de pega

São mostrados no GRÁF. 7 os resultados obtidos para o tempo de início de pega das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 7 - Tempo de início de pega das 12 formulações avaliadas



Fonte: Autor (2018).

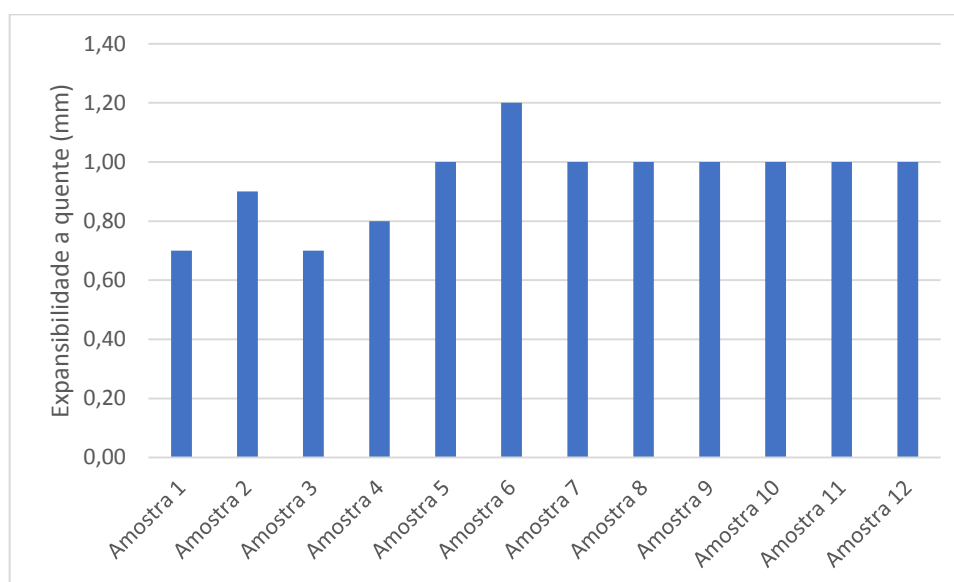
O tempo de início de pega das doze amostras ficou dentro do estabelecido na TAB. 4 do item 4.1.2 do referencial teórico, onde é fixado o valor de ≥ 60 min. A média das amostras apresentou valor de 236 min, o que equivale a 3 horas e 9 min. Quanto ao desvio padrão, este foi de 10,4 min e o coeficiente de variação foi de 4,4%.

Percebeu-se que com 0% de adição de escória de aciaria (LD) a amostra (formulação) 1 apresentou o tempo de pega de 220 min, na medida que se fixou 10% de adição de escória de aciaria (LD) e, média de 18,3% de adição de escória de alto-forno e adição de clínquer na média de 58,2% o tempo de pega reagiu com média de 249 min o que nos mostra que a combinação de escória de aciaria (LD) em conjunto com a escória de alto-forno aumentam o tempo de pega.

6.2.3 Expansibilidade a quente

São mostrados no GRÁF. 8 os resultados obtidos para a expansibilidade a quente das amostras (formulações) analisadas.

Gráfico 8 - Expansibilidade a quente das 12 formulações avaliadas.



Fonte: Autor (2018).

Os valores obtidos atenderam ao estabelecido na TAB. 4 do item 4.1.2 do referencial teórico, que é $\leq 5,0$ mm. Percebeu-se que nas amostras onde foram adicionados percentuais $\geq 10\%$ de escória de aciaria (LD), foi obtida a expansibilidade média de 1,03 mm, com desvio padrão de 0,14 mm e coeficiente de variação de 14,1%.

Nos testes feitos por SILVA et al., (2015), com adição de escória de aciaria (LD) no cimento tipo CP III E 32 descritos nas formulações das TAB.16, os valores desse parâmetro também ficaram dentro do permitido pela TAB.4. Na TAB. 17 é possível conhecer os resultados dos testes do autor supracitado, comprovando-se que adições $\geq 10\%$ proporcionam maior expansibilidade a quente.

Tabela 15- Resultado expansibilidade quente

Expansibilidade a quente em mm			
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0,9	1,2	2,5	2,55

Fonte: SILVA et al. (2015).

6.2.4 Resistência à compressão

A TAB.18 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos nas doze amostras de cimento tipo CP II E 32 que tiveram adição de escória de aciaria (LD).

Tabela 16 - Resultados das resistências à compressão das amostras analisadas.

Resultado das Resistência à Compressão (MPa)				
Amostras	Idades			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Amostra 1	15,6	24,7	29,1	36,1
Amostra 2	14,4	24,4	29	35,9
Amostra 3	15,1	23,8	28,6	35,6
Amostra 4	15	23,7	28,1	35,3
Amostra 5	15,5	22,8	27,6	35,2
Amostra 6	15	22,5	27,6	33,6
Amostra 7	15,1	23,8	28,5	35,3
Amostra 8	15,1	23,2	29,2	35,5
Amostra 9	13,5	23	28,9	34,6
Amostra 10	14	22,4	28	34,1
Amostra 11	14,7	22,8	28,5	35
Amostra 12	14,5	22,1	27,8	33,6

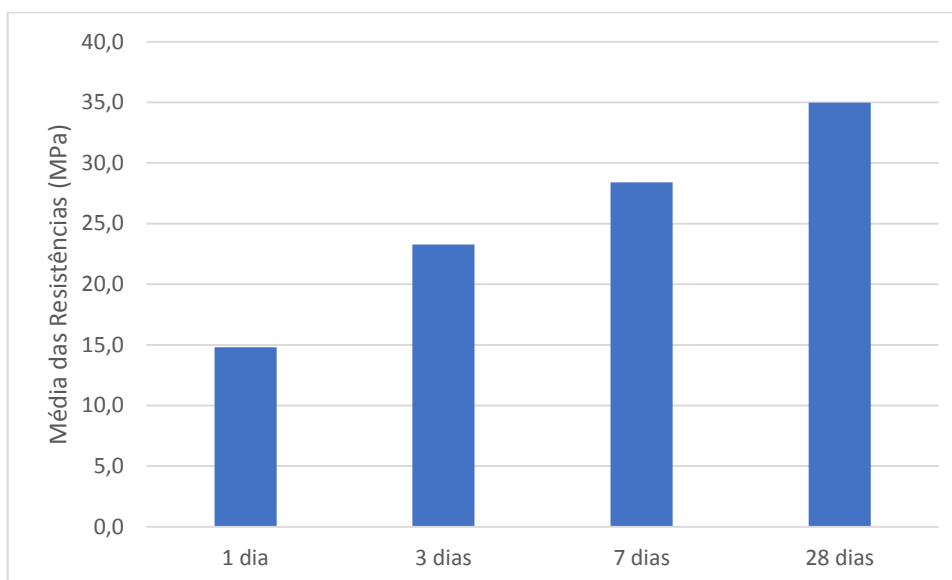
Fonte: Autor (2018).

A resistência à compressão das doze amostras mostrou-se satisfatória perante as TAB. 4 e 5 do item 4.1.2 do referencial teórico, atendendo às exigências mínimas à compressão nas idades R-3, R-7 e R-28.

A ruptura na idade de 1 dia (R-1) foi realizada apenas para controle interno do laboratório da cimenteira, pois as TAB.4 e 5 não mencionam ensaios à compressão para corpos de prova de 1 dia. Contudo, os corpos de prova foram rompidos respeitando a tolerância de tempo mínima, conforme TAB.15 descrita no item 5.5.4 do material e métodos.

O GRÁF.9 apresenta as resistências médias das amostras verificadas para as idades R1, R3, R7 e R28, que também ficaram satisfatórias perante as TAB. 4 e 5 do referencial teórico. O desvio padrão e coeficiente de variação das amostras, para esse parâmetro, estão descritos na TAB.19.

Gráfico 9 - Médias das resistências das 12 formulações avaliadas



Fonte: Autor (2018).

Tabela 17 - Desvio padrão e coeficiente de variação nas idades de 1,3,7 e 28 dias

Idade (dias)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (MPa)
1	0,6	4,1
3	0,82	3,5
7	0,58	2,0
28	0,84	2,4

Fonte: Autor (2018).

A amostra com adição de escória de aciaria (LD) que apresentou melhor resultado de compressão foi a amostra 2, onde foi adotada a seguinte formulação base: escória de aciaria(LD) 3,5%, escória de alto-forno 21,5%, clínquer 61,5%, gesso 3,5% e calcário 10% (porcentagens em massa), gerando uma resistência à compressão de 3,9 MPa acima da exigida pela NBR 16697(ABNT, 2018), que é de 32 MPa aos 28 dias.

Na medida em que se aumentou a adição de escória de aciaria (LD) nas amostras de 3 a 12, com média de adição de 9,5%, houve uma perda de resistência que variou de 33,6 MPa a 35,5 MPa, com diferença de 1,9 MPa. Mesmo com esta diferença, o menor resultado, aos 28 dias, superou em 1,3 MPa os 32 MPa exigidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os testes feitos por SILVA et al., (2015) com as formulações de escória de aciaria (LD) descritas na TAB.16 na produção do CP III E 32, apresentaram os resultados da TAB.20. Os índices de resistência para as idades de 1,3,7 e 28 dias são as mesmas para ambos os tipos de cimento, CP II E 32 e CP III E 32, conforme TAB.4 e 5 do referencial teórico.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios à compressão

Resistência à Compressão (MPa)				
Amostras	Idades			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Amostra 1	8,4	17,1	28,2	45,5
Amostra 2	7,5	16,6	27,8	46,3
Amostra 3	6,4	15,5	26,6	46,6
Amostra 4	7,6	16,8	28	48,2

Fonte: Silva et al., (2015).

É possível perceber que, no cimento CP III E 32, como a adição de escória de alto-forno é maior, podendo-se chegar a formulações que variam de 35% a 75%, os ganhos finais foram maiores do que no cimento CP II E 32, onde a adição das escória de alto-forno é limitada a 6% a 34% pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Comparando-se os testes do autor supracitado aos realizados no presente trabalho, a escória de aciaria (LD) mostrou-se satisfatória, levando a valores de resistência à compressão dentro dos parâmetros exigidos por norma.

Utilizando dados da cimenteira onde foram realizados os testes, a mesma produz em média 9 mil toneladas de cimento/dia. Se utilizarmos a menor formulação com adição de 3,5% estaremos retirando de pátios siderúrgicos 315 toneladas/dia, ao projetarmos este valor para um mês de produção estaremos oferecendo destinação final para 9450 toneladas.

Todas as formulações analisadas neste trabalho apresentam desempenho satisfatórios quanto aos requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos pela norma para a produção de cimento Portland CP II E 32. Todavia, a influência da adição de escória de aciaria (LD) na produção de cimento em concentrações diferentes e superiores às testadas nesse trabalho faz-se desejável para a continuidade da pesquisa. Enfim, a avaliação do comportamento de formulações com adições de escória de aciaria (LD) em percentuais maiores dos que foram testados neste trabalho, fica como proposta para futuros estudos.

7 CONCLUSÕES

A utilização de escória de aciaria gerada em fornos conversores Linz-Donawitz (LD) como adição em cimento CP II E 32 é possível e promissora.

As doze formulações testadas atenderam às exigências químicas, físicas e mecânicas estabelecidas na NBR 16697:2018.

A formulação base composta por 3,5% de escória de aciaria (LD), 21,5% de escória de alto-forno, 61,5% de clínquer, 3,5% de gesso e 10% de calcário (porcentagens em massa) foi a que proporcionou a maior resistência à compressão.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L.A.O.B. Produtos Siderúrgicos. In: FALCÃO BAUER, L. A (Coord.). **Materiais de Construção II**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Cap.21,628.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

_____. **NBR 16697**:Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. **NBR 5019**: Produtos e Ligas de Cobre – Terminologia. Rio de Janeiro, RJ,2001.

_____. **NBR NM 18: 2012**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11579:2012** Versão corrigida: 2013: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **NBR 11582:2016** Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

_____. **NBR NM 15: 2004**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 16: 2012**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**, 2002 -Rev 7. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/products-page/>>. Acesso em 12 maio 2018.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. 2006Disponível em: <www.cimento.org.br >. Acesso 12 de maio 2018.

BAUER, L. A. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BOLOTA, J. R. Refino secundário de aços. In: MOURÃO, M.B. (Coord.). **Introdução à siderurgia**. São Paulo: ABM, 2011. cap.07, p.189- 215.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blucher,2008.

DE PAULA, L. G. **Análise Termo Econômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co - processamento de Misturas de Resíduos**. 2009.179 p.Tese (Mestrado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2009.

FOREINGN LAND LTDA. **Curso de microscopia de clínquer de cimento portland**. Curitiba, PR, 2006. 52 p. (Apostila).

GUMIERI A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002.8p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GEYER. R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade do uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001.7p. (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GOMIDES, W.M. **Processo de fabricação de cimento**. Mato Grosso: Cimento Itaú, 1996.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística Preliminar**. Número 036 – março /2018. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br>>. Acesso em: 12 maio.2018.

LOPES, R. **Análise da formação de colagem no forno de clínquer: Um estudo de caso na fábrica de cimento**. 2009. 127 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2009).

MALYNOWSKYJ, A. Fabricação de aço líquido em conversores a oxigênio. In: Mourão, M.B. (Coord.) **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2011.cap. 5, pag.125 – 168.

MOURÃO, M.; GENTILE, E. F. Visão geral do processo siderúrgico. In: Mourão, M.B (Coord.) **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2011.cap 1, pag.1-20.

MILANEZ, B, OLIVEIRA, L.; FIRPO M.S. **A coincineração de resíduos em forno de cimento; riscos para a saúde e o meio ambiente**. Ciência e a saúde coletiva, Rio de Janeiro, v.14, n.6, p.2143-2152, dez.2009.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre com adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 13p.Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

_____. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. São Paulo: Globo, 1998.307. p.

PFEIL, W. **Estrutura de aço**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

POLISSENI A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**.2005. 14p. (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D.da S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 3.ed. Belo Horizonte:UFMG,2011.

RAMOS, F. M; POLISSEI, A. E; FREESZ, J. W. S. Gestão ambiental da escória de aciaria. **Portal metálica construção civil**. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/gestao-ambiental-da-escoria-de-aciaria>>. Acesso em: 14 de out. 2018.

SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia**. Belém: IFPA: Santa Maria: UFSM, 2011.110p.

SILVA, S. N. et al., -**Aplicação de Escória de Aciaria LD na Fabricação do Cimento Portland CPIII**-Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET- Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, GUILHERME F. B. Siderurgia e Meio Ambiente. In: MOURÃO, M.B. (Coord.). **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2011. Cap.11 p. 359 – 399.