

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR - MG
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
JOÃO PAULO OLIVEIRA CASTRO

**DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO EM
LABORATÓRIO, UTILIZANDO A ESCÓRIA ÁCIDA COMO MATERIAL
POZOLÂNICO**

FORMIGA – MG
2016

JOÃO PAULO OLIVEIRA CASTRO

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO, UTILIZANDO A
ESCÓRIA ÁCIDA COMO MATERIAL POZOLÂNICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção do UNIFOR- MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Me. Elifas Levi da Silva

FORMIGA – MG

2016

João Paulo Oliveira Castro

Desenvolvimento de Cimento Portland Pozolânico, utilizando a escória ácida como material pozolânico

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção do UNIFOR- MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

BANCA EXAMINADORA

Orientador

Prof. Me. Elifas Levi da Silva

Examinador

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Ramos

Formiga, 18 de novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e persistência para superar este período e pelas bênçãos que foram a mim concedidas.

Aos meus pais, José e Marta, e ao meu irmão que não mediram esforços para que eu chegasse a este momento.

A minha esposa Karol, pela compreensão, amor e por abrir mão de muitas coisas para me apoiar, agradeço também a minha filha, Ana Luísa, que me deu mais forças para finalizar mais esta etapa na minha vida.

Aos meus sogros, Osvaldo e Estefânia, pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Elifas, pelo suporte e dedicação e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que eu realizasse este trabalho: colaboradores e amigos da CSN, que me ajudaram no desenvolvimento, a CSN, pela disposição dos equipamentos e materiais.

Todos que de maneira direta e indiretamente me ajudaram, muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade do desenvolvimento do cimento Portland pozolânico CP IV 32, utilizando como material pozolânico a escória ácida. Para isto foram realizados, ensaios químicos e físicos para verificação da atividade pozolânica da escória ácida, caracterizado também as outras matérias-primas que são utilizadas na produção do cimento, clínquer gesso e material carbonático. Após a caracterização das matérias-primas, foram desenvolvidas cinco amostras de cimento em um moinho piloto de laboratório alterando a adição da escória em 30, 35, 40, 45 e 50%, fixando a adição de gesso e material e carbonático em 3% e o clínquer se alterava conforme alterava-se a adição da escória ácida. Após o desenvolvimento das cinco amostras de cimento foram realizados ensaios químicos, físicos e mecânicos exigidos pela NBR 5736:1999. Os dois testes de Índice de Atividade Pozolânica foram satisfatórios, O IAP com cimento apresentou o resultado de 93%, ficando 18% acima do que é estabelecido na norma, o IAP com a cal, apresentou um resultado de 9 MPa, ficando 3 MPa acima do que exige a norma. O valor do Índice de Hidraulicidade foi de 0,92, o que permite o estudo da escória ácida como material pozolânico. As cinco amostras de cimento desenvolvidas no laboratório atenderam as exigências químicas, físicas e mecânicas. Por fim realizou-se um estudo comparativo entre os custos das matérias-primas do cimento CP II E 32 fabricado atualmente pela empresa com o cimento CP IV 32 que utiliza escória ácida, concluindo-se que a partir da adição de 40% de escória ácida na produção do CP IV 32, o custo é menor que o CP II E 32, relacionando somente o custo das matérias-primas, o CP IV 32 pode ter um custo de até 8,78% mais baixo que o CP II E 32 produzido pela empresa em escala industrial.

Palavras-chave: Clínquer. Atividade Pozolânica. CP IV 32.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coliseu	18
Figura 2 - Clinquer antes da moagem	23
Figura 3 - Fluxograma de fabricação de cimento	30
Figura 4 - Mineração de Calcário junto a fabrica de cimento	31
Figura 6 - Moinho de bolas.....	32
Figura 7 - Esquema de pré-aquecedor e pré-calcinador	33
Figura 8 - Forno via seco com delimitações por zonas os quais define as etapas de reações que acontece durante o processo de queima	34
Figura 9 - Moinho de cimento com 2 câmaras	36
Figura 10 - Aparelho de Vicat e seus acessórios	41
Figura 11 - Agulha de Le Chatelier.....	42
Figura 12 - Matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento.....	49
Figura 13 - Hidróxido de Cálcio	50
Figura 14 - Cura dos corpos de prova em estufa	51
Figura 15 - Corpos de prova para teste de pozalinicidade	51
Figura 16 - Pastilhas de pó prensado.....	53
Figura 17 - Aparelho de fluorescência de raios X.....	54
Figura 18 - Moinho de corpos moedores.....	55
Figura 19 - Matérias-primas pesada.....	56
Figura 20 - Homogeneização das matérias-primas.....	56
Figura 21 - Permeabilímetro de Blaine (a) e Balança analítica (b)	57
Figura 22 - Forno Mufla	58
Figura 23 - Forno de indução LECO	60
Figura 24 - Peneirador aerodinâmico	61
Figura 25 - Aparelho de Vicat Automático	61
Figura 26 - Tela de resultados do Vicat Automático	62
Figura 27 - Ensaio de expansibilidade a quente.....	62
Figura 28 - Misturador mecânico Solotest.....	63
Figura 29 - Compactação da argamassa	63
Figura 30 - Corpos-de-prova sendo curados em água saturada	64
Figura 31 - Rompimento de corpo-de-prova.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo entre resultados de PF obtidos e a NBR 5736:1999	69
Gráfico 2 – Comparativo de resultados de MgO obtidos e a NBR 5736:1999	71
Gráfico 3 – Comparativo entre os resultados de SO ₃ obtidos e a NBR 5736:1999..	72
Gráfico 4 – Comparativo de resultados de CO ₂ obtidos e a NBR 5736:1999.....	73
Gráfico 5 – Comparativo de resultados de finura obtidos e a NBR 5736:1999	74
Gráfico 6 – Comparativo de resultados de finura obtidos e o CP II E 32 produzido na empresa em estudo.....	74
Gráfico 7 – Comparativo de resultados de Início de Pega obtidos e a NBR 5736:1999	75
Gráfico 8 – Comparativo e resultados de Fim de pega obtidos e a NBR 5736:1999.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos principais tipos de Cimentos Portland produzidos no Brasil	20
Tabela 2 - Compostos do Clinquer	22
Tabela 3 - Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao Cimento Portland Comum	25
Tabela 4 - Quantidade de materiais em massa, para moldagem de seis corpos de prova	29
Tabela 5 - Materiais componentes para composição da argamassa	43
Tabela 6 - Evolução média da resistência à compressão do CP IV 32 brasileiro... 43	
Tabela 7 - Qualidade química e física do CP II F 32	52
Tabela 8 - Receitas utilizadas para composição das amostras de cimento (%).....	55
Tabela 9 - Quantidade em massa das receitas	56
Tabela 10 - Exigências químicas.....	58
Tabela 11 - Exigências físicas e mecânicas.....	58
Tabela 12 - Resultados das análises químicas da escória ácida	66
Tabela 13 - Índice de atividade pozolânica com hidróxido de cálcio	67
Tabela 14 - Índice de atividade pozolânica com cimento	67
Tabela 15 - Resultados de Clinquer, Gesso e Material carbonático.....	68
Tabela 16 - Tempo de moagem das receitas de cimento	69
Tabela 17 - Resultados químicos das amostras dos cimentos produzidos	70
Tabela 18 Resultados de Resistências a compressão do cimento produzido no laboratório.....	77
Tabela 19 - Diferença percentual entre o custo do CP II E 32 e CP IV 32.	77

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Classificação dos Materiais Pozolânicos.....	27
---	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	PROBLEMA.....	17
5	REFERENCIAL TEÓRICO	18
5.1	História do Cimento Portland	18
5.2	Tipos de Cimento Portland	19
5.2.1	Cimento Portland Pozolânico.....	21
5.3	Características e propriedades químicas do cimento	21
5.4	Composição do Cimento Portland	22
5.4.1	Clinker	22
5.4.2	Gesso	23
5.4.3	Escória.....	23
5.4.3.1	Composição química da escória.....	24
5.4.3.2	Escória Ácida.....	25
5.4.4	Materiais Carbonáticos	26
5.4.5	Materiais Pozolânicos	26
5.4.5.1	Reações Pozolânica	27
5.4.5.2	Determinação da atividade pozolânica	28
5.4.5.2.1	Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias – ABNT NBR 5752:2014.....	28
5.4.5.2.2	Índice de atividade pozolânica com cal – ABNT NBR 5751:2012	29
5.5	Processo de fabricação de cimento.....	30
5.5.1	Extração de Matérias prima	31
5.5.2	Armazenagem e pré-homogeneização.....	31
5.5.3	Moagem da mistura	32
5.5.4	Pré-aquecimento e Pré-calcinadores.....	33
5.5.5	Clinkerização	34

5.5.6	Resfriamento do Clinquer	35
5.5.7	Moagem de Clinquer e Armazenagem do cimento	35
5.5.8	Expedição	36
5.6	Controle de Qualidade exigidos para o cimento Portland pozolânico	36
5.6.1	Análises químicas	36
5.6.1.1	Perda ao fogo e Anidrido Carbônico (CO ₂)	37
5.6.1.2	Óxido de Magnésio	37
5.6.1.2.	Trióxido de enxofre (SO ₃)	37
5.6.2	Análises Físicas e Mecânicas	38
5.6.2.1	Finura.....	38
5.6.2.2	Tempo de Pega	39
5.6.2.3	Expansibilidade a quente.....	41
5.6.2.4	Resistência à compressão	42
5.7	Fluorescência de raios X (FRX)	44
5.8	A Indústria Cimenteira no Brasil, seus custos e impactos ambientais	44
5.8.1	Custos.....	45
5.8.2	Impactos ambientais causados pela indústria cimenteira	46
6	MATERIAL E MÉTODOS	48
6.1	Local do estudo.....	48
6.2	Escolha da amostra	48
6.3	Coleta de dados.....	50
6.3.1	Determinação da Atividade Pozolânica da Escória ácida	50
6.3.2	Resíduo Insolúvel	52
6.3.3	Composição química	53
6.3.4	Desenvolvendo o cimento em laboratório.....	54
6.3.5	Ensaio para a verificação das exigências químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland pozolânico desenvolvido no laboratório.....	57
6.3.6.1	Ensaio para verificação das exigências químicas	58
6.3.6.2	Determinação de Perda ao fogo – ABNT NBR NM 18:2012.....	58
6.3.6.2	Óxido de Magnésio	59
6.3.6.3	Trióxido de enxofre (SO ₃) e Anidrido Carbônico (CO ₂).....	60
6.3.7	Ensaio para verificação das exigências físicas e mecânicas	60
6.3.7.1	Determinação de Finura por peneirador dinâmico – ABNT NBR 12826:2014.....	60

6.3.7.2	Determinação do Tempo de pega – ABNT NBR 65.....	61
6.3.7.3	Determinação de expansibilidade a quente – ABNT NBR 11582:2012	62
6.3.7.4	Determinação da resistência à compressão – ABNT NBR 7215:1996	63
6.3.8	Avaliação do custo da escória ácida utilizada para a produção do CP IV 32	65
6.4	Método de análise.....	65
7	análises e resultados	66
7.1	Caracterização da escória ácida.....	66
7.1.1	Índice de Atividade Pozolânica	67
7.1.2	Índice de atividade pozolânica com cimento.....	67
7.2	Caracterização do Clinquer, Gesso e Material carbonático	68
7.3	Desenvolvendo o cimento.....	68
7.4	Resultados das análises químicas das amostras de cimento CP IV 32....	69
7.4.1	Perda ao fogo	69
7.4.3	Trióxido de enxofre (SO ₃)	71
7.4.4	Anidrido Carbônico (CO ₂)	72
7.5	Resultados das análises físicas e mecânicas das amostras de cimento ..	73
7.5.1	Determinação de Finura	73
7.5.2	Tempo de pega.....	75
7.5.3	Expansibilidade a quente.....	76
7.5.4	Resistência à compressão.....	76
7.6	Comparação de custo entre a escória utilizada no trabalho com a escória utilizada na empresa	77
8	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

O mercado de cimento no Brasil é atualmente composto por 22 grupos cimenteiros nacionais e estrangeiros, com 95 plantas produzindo, a capacidade de produção do país é de 82 milhões de toneladas/ano (CIMENTO.ORG, 2015). Devido à queda do PIB no país, ao qual possui uma ligação forte com o ramo da construção civil, as vendas internas de cimento em janeiro de 2016 caíram 20,7% comparado ao mesmo mês de 2015 (SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO).

Para que a empresa se mantenha competitiva é necessária à busca de novos produtos que ofereça maior margem de lucratividade, e com componentes com o menor custo, mas sempre mantendo a qualidade e atendimento as normas especificadas.

Há também a preocupação mundial pelo desenvolvimento sustentável, o que às vezes limita o uso das matérias-primas não renováveis. Visto que indústria cimenteira é grande consumidora destas matérias, a necessidade de reciclar resíduos industriais tem sido um dos recursos utilizados tanto para atendimentos as leis ambientais, quanto para redução dos custos de produção em fabricas de cimento.

O ramo da construção civil é um dos grandes consumidores de resíduos gerados em outros segmentos, como por exemplo, a adição de materiais pozolânicos e escórias de alto forno na fabricação do cimento. Com isso, a fabricação dos cimentos compostos é de grande importância para o controle deste cenário.

Para a produção de cimento, o Brasil utiliza em sua maioria a escória básica, produzida em alto forno à coque, já a escória ácida, produzida em alto forno à carvão vegetal, ainda não é tão aproveitada e com isso, se acumula nas usinas. A utilização destes materiais na produção, elimina o processo de calcinação da matéria-prima, reduzindo o consumo de energia e o custo de produção.

Através deste trabalho, buscou-se avaliar a utilização da escória ácida, na produção do Cimento Portland Pozolânico – CP IV 32 na empresa pesquisada. Avaliando primeiramente a escória ácida a ser utilizada, pois devido ao seu alto teor de Resíduo Insolúvel, limita a sua utilização como adição em cimentos Portland que possuem limites normativos para esta característica química, como por exemplo, CP

II E 32, CP III 32 e outros. Já para o cimento Portland pozolânico, não há limites normativos para teores de Resíduo Insolúvel, o que permite utilizar a escória em até 50% em massa na produção de cimento. Identificado então, no item 3.3.2.3 da norma NBR 5736:1991, que considera a escória ácida como material pozolânico, a possibilidade de utilizá-la para a produção do cimento tipo CP IV – Cimento Portland Pozolânico.

Para isso foi realizada a moagem das matérias-primas principais da produção de cimento, (Clinquer, Gesso, Calcário e Escória) em um Moinho piloto de laboratório, onde gerou cinco amostras de cimento, ao qual após a moagem passaram por análises físicas, mecânicas e químicas especificadas pela norma ABNT NBR 5736:1991, para verificação da efetividade do teste.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar através de simulação de moagem em laboratório a possibilidade de desenvolver o Cimento Portland Pozolânico, utilizando como material pozolânico a escória ácida.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar a atividade pozolânica da escória ácida através dos ensaios de Índice de Atividade Pozolânica especificado nas normas ABNT NBR 5751:2012 e ABNT NBR 5752:2014;
- ✓ Simular em laboratório a produção de cimento utilizando um moinho de bolas; alterando a adição de escória em 30, 35, 40,45 e 50% na receita do cimento;
- ✓ Realizar análises físicas e químicas das amostras de cimento provenientes da moagem;
- ✓ Comparar o custo do produto desenvolvido com o produto que é fabricado hoje na empresa.

3 JUSTIFICATIVA

Em virtude da dificuldade de obtenção da escória de alto-forno a média e longo prazo de boa qualidade, que possua baixo resíduo insolúvel e reatividade alta, o desenvolvimento de novos produtos utilizando matérias-primas menos nobres necessita ser avaliado.

Para produzir é necessário o consumo, e a consequência disso, é a geração de resíduos. Então é de grande importância, buscar novos meios para o reaproveitamento de resíduos provenientes de outros processos, que neste caso, a escória de alto-forno a carvão vegetal.

Visto a possibilidade de avaliação deste material através uma estação de beneficiamento situada em Divinópolis (a 90 km da empresa) que capta escórias de alto-forno da região metropolitana de Belo Horizonte.

Mediante a estes fatores, justifica-se o interesse de analisar através de análises físicas e químicas a possível utilização deste material para fabricação de futuros produtos da empresa.

4 PROBLEMA

A empresa onde se realizou o teste possui no momento somente um fornecedor de escória, sendo essa de característica básica, que é utilizada como adição na produção de cimento, com isso se faz necessário à avaliação de possíveis novas matérias-primas a serem utilizadas em seus produtos.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial visa compreensões teóricas e técnicas relacionadas à fabricação e impactos do cimento Portland, fornecendo conhecimentos básicos de suas composições e características, focalizando em especial o Cimento Portland Pozolânico.

5.1 História do Cimento Portland

“Cimento Portland é obtido através da pulverização do clínquer, que tem em sua constituição, essencialmente silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural, com adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego”. (BAUER, 2011).

Segundo Battagin (2006) a palavra cimento tem origem do latim *Caementu*, que derivava de uma pedra natural não esquadrejada originada dos rochedos de Roma, a origem do cimento remonta a cerca de 4500 anos, onde os imponentes monumentos do Egito já utilizavam em suas construções uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. Como ilustra a FIG.1 as grandes obras gregas e romanas, como o Coliseu e o Panteão, foram construídas com solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que sob a ação da água possuíam propriedades de endurecimento.

Figura 1 - Coliseu



Fonte: Revista pelo mundo (2013).

Em 1756 o inglês John Smeaton, foi o responsável pelo grande passo para o desenvolvimento da indústria de cimento, ele obteve um produto de alta resistência através da calcinação de calcário moles e argilosos. O francês Vicat, em 1818, obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, misturando componentes calcários e argilosos, o que levou ele a ser considerado o pai do cimento artificial. (BATTAGIN, (2006).

De acordo com a ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002), o construtor inglês Joseph Aspdin, em 1824, queimou juntamente pedras calcárias e argilas, originando em um pó fino, percebeu que obtinha uma mistura, que após seca, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções da Inglaterra. Na época era comum construir com uma pedra da ilha de Portland, que situava no sul deste país, a cor e a dureza dessa pedra se assemelhava com a invenção de Aspdin, na sua patente o nome da ilha foi utilizado, criado o nome que conhecemos hoje, Cimento Portland.

Segundo Battagin (2006), no Brasil algumas tentativas de produção de cimento aconteceram de 1888 a 1924, mas foi em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, São Paulo, cuja construção pode ser considerada um marco da implantação da indústria brasileira de cimento, que se deu o início da produção. Em 1926 as primeiras toneladas de cimento foram colocadas no mercado, até então o consumo do país dependia totalmente do produto importado. A produção foi se elevando gradativamente com a implantação de novas fabricas e com o tempo a participação de produtos internacionais oscilou, até praticamente desaparecer.

5.2 Tipos de Cimento Portland

Segundo a ABCP (2002), o cimento Portland é composto de clínquer e adições, sendo o clínquer o principal componente, sendo utilizado em todos os tipos de cimento Portland, já as adições variam de um cimento para o outro, e são elas principalmente que definem os diferentes tipos de cimento.

As determinações da qualidade e da quantidade de matérias-primas utilizadas na produção dos diversos tipos de cimento Portland, não podem atender à vontade unilateral de um produtor ou consumidor, para isso existe no país, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que prepara e divulga normas que são

usadas no mercado como padrão de referência. Estas normas técnicas definem as características e propriedades mínimas que os cimentos Portland devem apresentar, e os métodos de ensaio empregado para verificação do atendimento as respectivas normas (ABCP, 2002).

No Brasil são fabricados vários tipos de cimentos Portland, sendo diferenciados pela quantidade dos compostos que são utilizados na sua fabricação. A TAB. 1 ilustra os principais tipos de cimento produzido no Brasil e suas respectivas normas.

Tabela 1 - Composição dos principais tipos de Cimentos Portland produzidos no Brasil

Tipos	Siglas	Composição em massa %				Normas Técnicas
		Clinker + Gesso	Escória de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Cimento Portland Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I – S	95-99	1-5	1-5	1-5	
	CP II – E	56-94	6-34	-	0-10	
Cimento Portland Composto	CP II – Z	76-94	-	6-14	0-10	NBR 11578
	CP II – F	90-94	-	-	6-10	
Cimento Portland de Alto forno	CP III	25-65	35-70	-	0-5	NBR 5735
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	45-85	-	15-50	0-5	NBR 5636
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	95-100	-	-	0-5	NBR 5733
Cimento Portland Resistentes a Sulfatos	Todas as siglas acrescidas de RS – Ex: CP II Z – 32 – RS	Conforme o tipo de cimento	NBR 5737			

Fonte: ABCP (2002) adaptada

Os vários tipos de cimento são designados pela sigla e por sua resistência. Segundo a ABCP (2002), as siglas correspondem ao prefixo CP – Cimento Portland,

acrescidos dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, tendo como classes indicadas 25, 32 e 40, referentes aos valores mínimos de resistência a compressão garantida pelo fabricante, após 28 dias de cura.

5.2.1 Cimento Portland Pozolânico

Segundo a NBR 5736 (ABNT, 1999), Cimento Portland Pozolânico pode ser definido como “aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado”. Ainda segundo a NBR 5736, o cimento pozolânico é designado pela sigla CP IV.

O cimento Portland pozolânico tem baixo calor de hidratação, o que torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas, com o elevado teor de material pozolânico, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, especialmente de ataque de sulfatos. Tem alta eficiência em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento (CIMENTO.ORG, 2010).

O cimento Portland Pozolânico, é utilizado “para obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com o Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação (ABCP, 2016).

5.3 Características e propriedades químicas do cimento

O cimento Portland é basicamente o produto da calcinação de uma mistura de calcário, rico em CaCO_3 (Carbonato de Cálcio), e materiais argilosos, compostos principalmente de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , há também em menores quantidades, constituintes secundários, óxido de magnésio, fosfatos, álcalis e outros, (NEVILLE, 2002).

Segundo Bauer (2011), Na_2O , K_2O e outras substâncias menores, são indesejadas na mistura, pois representam as impurezas do cimento, já os demais compostos como óxido de cálcio, sílica, óxido de ferro e alumina são essenciais para o cimento Portland. Quando estes elementos são combinados em proporções adequadas e calcinados em fornos a temperatura maior que 1000°C , são desencadeadas reações químicas que provocam os surgimentos dos compostos descritos na (TAB. 2).

Tabela 2 - Compostos do Clinquer

CONSTITUINTES DO CLINQUER	
PRINCIPAIS	SECUNDÁRIOS
Silicato Tricálcico: Ca_3SiO_5 - C_3S - Alita	Arcanita: K_2SO_4
Silicato Bicálcico: Ca_2SiO_4 - C_2S - Belita	Aphitalita: $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$
Aluminato Tricálcico: CaOAl_2O_3 - C_3A	Langbeinita: $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$
Ferro-Aluminato Tetracálcico: $\text{CaO}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ - C_4AF	Oldhamita: CaS
Periclásio: MgO	Wustita: FeS
Cal livre: $\text{CaO}_{\text{livre}}$	Fe^0

Fonte: Adaptado de GIUNTINI (2007).

5.4 Composição do Cimento Portland

A NBR 5732 (ABNT, 1991) descreve as principais adições utilizadas na produção do cimento, que serão mencionadas no item 5.4.1 até o 5.4.5.

5.4.1 Clinquer

O clinquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, primeiramente a rocha calcária é britada, e posteriormente moída, e em seguida misturada em proporções adequadas com a argila moída. A mistura formada atravessa então um forno, geralmente giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar a 1450°C , devido a este intenso calor, a mistura é transformada em um novo material, denominado Clinquer, na saída do forno ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó, (ABCP 2002). (FIG. 2).

Figura 2 - Clinquer antes da moagem



Fonte: E-Civil (2016)

5.4.2 Gesso

A adição de gesso ou gipsita ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), tem como objetivo principal, retardar o tempo de pega do cimento, se caso não houvesse esta adição, a pega do cimento seria de poucos minutos, inviabilizando o uso. Com isso o gesso é obrigatoriamente utilizado na fabricação de cimento, sendo presente desde os primeiros tipos de cimento Portland. (PANZERZA, 2010).

5.4.3 Escória

Durante a produção do ferro-gusa, há a necessidade de eliminação de impurezas, que vêm associadas aos metais no seu estado natural. Com isso, são adicionados no processo algum combustível, podendo ser, coque ou carvão vegetal, e algum fundente, CaO , MgO e CaF , sendo o primeiro deles o de maior utilização. Com a utilização de fundentes, é possível reduzir-se o ponto de fusão das impurezas, gerando a escória líquida, através da reação química entre o fundente e as impurezas, que são mais leves do que o metal, sendo facilmente separada. (IBRACON, 2007).

Segundo John (1995) a escória de alto forno é um resíduo da produção de ferro gusa em alto forno, para produção de uma tonelada de ferro gusa, são geradas 300 Kg de escória, isto utilizando carvão de coque, para fornos que utilizam carvão vegetal a geração de escória é inferior.

As escórias de alto-forno são subprodutos obtidos durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas, tem aparência de grãos de areia, possuem

características aglomerantes muito semelhantes ao do clínquer. Com isso a escória de alto-forno pode ser adicionada a moagem de clínquer e gesso, em certas proporções, obtendo um cimento que atenderá plenamente aos usos comuns, apresentando ainda melhorias de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência. (ABCP, 2002).

5.4.3.1 Composição química da escória

A composição química das escórias de alto-forno é influenciada pelos constituintes e pelas proporções nas matérias-primas, e também pelo seu processo de fabricação do aço, mas com limites relativamente estreitos, a composição química das escórias está entre as das pozolanas e a do cimento Portland (IBRACON, 2007).

De acordo com a IBRACON (2007), as composições químicas das escórias de alto-forno podem classifica-las por meio da relação CaO/SiO_2 , sendo que, escórias de alto-forno básicas (relação $\text{CaO/SiO}_2 > 1$) e escórias de alto-forno ácidas (relação $\text{CaO/SiO}_2 < 1$). Os principais elementos encontrados na escória de alto-forno são CaO , MgO , Al_2O_3 e SiO_2 , representando, em média, 95% do total dos óxidos. A TAB. 3 apresenta as composições químicas típicas das escórias produzidas pelos diferentes processos, os componentes encontrados nas escórias são os mesmos encontrados no cimento Portland.

Tabela 3 - Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao Cimento Portland Comum

Elementos	Escória Básica	Escória Ácida	Cimento Portland
CaO	40 – 35	24 – 39	66
SiO ₂	30 – 35	38 – 55	22
Al ₂ O ₃	11 – 18	8 – 19	5
MgO	2,5 – 9	1,5 – 9	-
Fe ₂ O ₃	0 – 2	0,4 – 2,5	3
FeO	0 – 2	0,4 – 1,5	-
S	0,5 – 1,5	0,03 – 0,2	-
CaO/SiO ₂ média	1,31	0,68	3

Fonte: Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio (JONH, 1995).

5.4.3.2 Escória Ácida

Segundo John (1995) dos cerca de 36% da escória produzida anualmente no Brasil é proveniente da produção de ferro gusa em altos-fornos que utilizam carvão vegetal, o que gera a escória ácida, onde a relação entre $\text{CaO/SiO}_2 < 1$, sendo menos reativas que a escórias básicas que possuem relação $\text{CaO/SiO}_2 > 1$, e que são produzidas em altos-fornos que utilizam carvão coque.

Soares (1982) considera que um alto teor de óxido de alumínio (Al_2O_3) pode neutralizar a acidez, deixando a escória com características básicas. A relação CaO/SiO_2 representa Índice de basicidade e a relação $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ maior que 1 representa o Índice de Hidraulicidade. Se este índice for igual ou maior que 1, demonstra que a escória possui atividade hidráulica o suficiente para ser utilizada na fabricação de cimento Portland de alto forno, se caso o Índice de Hidraulicidade for menor que 1, a escória pode apresentar características pozolânicas, o que permite a sua utilização na fabricação de cimento Portland pozolânico.

De acordo com Massucato (2005), as escórias ácidas são em grande parte produzidas por produtores independentes de ferro-gusa e essas escórias ainda se constituem em resíduos que se acumulam nas usinas. Quando as mesmas se

encontram granuladas, apresentam atividades hidráulicas podendo ser utilizadas como adições no cimento.

5.4.4 Materiais Carbonáticos

De acordo com Coimbra (2006), o material carbonático é basicamente composto de carbonato de cálcio (CaCO_3) e é encontrado abundantemente na natureza, ele é utilizada na fabricação do cimento como material de diluição, para reduzir o teor de outros componentes de maior custo, tendo que manter as proporções exigidas nas normas, é também empregado como elemento de preenchimento, sendo capaz de penetrar nos interstícios das demais partículas, agindo como lubrificante, tornando o produto mais plástico e não prejudicando a atuação dos demais elementos.

5.4.5 Materiais Pozolânicos

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), Materiais Pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, não possuem ou possuem pouca propriedade ligante, mas, se finamente divididos e junto à presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos ligantes.

Segundo Leite e Molin (2002), as pozolanas podem ser de origem natural, sendo geradas a partir do intemperismo de rochas vulcânicas, ser artificiais, quando a argila é submetida a altas temperaturas, ou ainda, subprodutos industriais, como escória de alto forno, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, entre outros.

Como ilustra o QUADRO 1, a NBR 5736 (ABNT, 1999), classifica a pozolana da seguinte forma:

Quadro 1 – Classificação dos Materiais Pozolânicos

CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS	
Pozolanas naturais	Materiais de origem vulcânica, geralmente ácidos ou de origem sedimentar.
Pozolanas artificiais	Materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica.
Argilas calcinadas	Materiais provenientes de calcinação de determinadas argilas, que quando tratadas a temperaturas entre 500°C e 900°C, adquirem a propriedade de reagirem com hidróxido de cálcio.
Cinzas volantes	Materiais finamente divididos proveniente da combustão de carvão pulverizado ou granulado.
Outros materiais	São considerados ainda como pozolanas artificiais outros materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, microssilica, rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral.

Fonte: Autor (2016).

5.4.5.1 Reações Pozolânica

Segundo Massazza (1993), o termo reações pozolânica é designado às pozolanas que apresentam propriedades de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio, sendo então, quanto maior o valor de hidróxido de cálcio adquirido pela pozolana, maior sua atividade, fenômeno este que resulta na formação de novas fases, que apresentarão resistência mecânica após o endurecimento, ela se processa através da reatividade pozolânica, que é o índice de reação do material pozolânico com os componentes da solução alcalina presentes nos cimentos, em especial o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 ou qualquer substância contendo Ca^{2+} , em temperaturas ambientes, resultando em produtos secundários, silicatos hidratados, que possuem características similares aos produtos encontrados na hidratação do cimento Portland.

De acordo com a IBRACON, (2007), pozolanas são os alumino silicatos reativos naturais, geralmente predominam na forma vítrea, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com os íons Ca^{2+} , levando a precipitação de silicatos de cálcio hidratados, sendo expressa pela equação (1).



Os materiais pozolânicos não reagem com a água da forma como são obtidos, mas quando são finamente moídos reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando aos compostos com propriedades aglomerantes, com isso, os materiais pozolânicos podem ser misturados ao clínquer, devido ao hidróxido de cálcio ser um produto normalmente resultante da hidratação do clínquer (DE PAULA, 2009).

5.4.5.2 Determinação da atividade pozolânica

Segundo De Pádua (2012) apud Massazza (1998), a atividade pozolânica é definida como a habilidade natural de materiais naturais ou subprodutos produzirem componentes que possuem propriedades ligantes, sendo resultado de sua reação com o hidróxido de cálcio presente na mistura.

Abaixo está descrito algumas formas de determinação de atividade pozolânica.

5.4.5.2.1 Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias – ABNT NBR 5752:2014

A NBR 5736 Cimento Portland Pozolânico (ABNT, 1999), define o índice de atividade pozolânica com cimento Portland como sendo a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias dos corpos de prova moldados com pozolanas e cimento com os corpos de prova referência, tendo como índices de valores iguais ou superiores a 75%.

Este ensaio é descrito na norma brasileira NBR 5752 (ABNT, 2014) (Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento aos 28 dias), ao qual primeiramente o material pozolânico a ser analisado deve passar por um processo de secagem a (105 ± 5) °C durante 24 horas e em seguida ser moído até que o retido na peneira de 45 µm seja inferior a 20%.

Após a preparação do material pozolânico, são preparadas 2 argamassas, utilizando como referência para a preparação a NBR 7215: (ABNT, 1996), com dosagens diferentes. Uma argamassa contendo cimento (Argamassa A), areia normal e água e outra argamassa contendo 25% de material pozolânico em substituição a igual porcentagem de cimento, areia e água (Argamassa B). A

quantidade de material em massa a ser utilizada para o ensaio está descrita no (TAB. 4).

Tabela 4 - Quantidade de materiais em massa, para moldagem de seis corpos de prova.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozolânico	-	156 ± 0,2
Areia Normal	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2

Fonte: adaptado da NBR 5752 (ABNT, 2014).

A cura dos corpos de prova é realizada conforme ABNT NBR 7215:1996, e o IAP é calculado conforme a equação (2).

$$\text{IAP}\% = \left(\frac{f_{cp}}{f_{cc}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

IAP_%: é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

f_{cp}: é a resistência à compressão média, aos 28 dias, de seis corpos de prova moldados com o cimento Portland e substituição de 25% da massa de cimento por volume do material pozolânico.

f_{cc}: é a resistência a compressão média, aos 28 dias, de seis corpos de prova moldados somente com o cimento Portland.

5.4.5.2.2 Índice de atividade pozolânica com cal – ABNT NBR 5751:2012

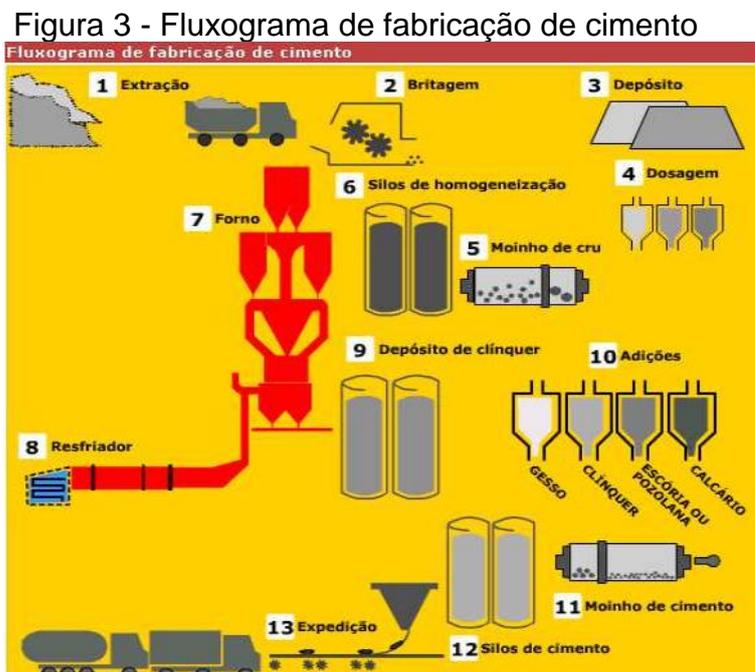
O Índice de Atividade Pozolânica prescrito na NBR 5751 (ABNT, 2012), conhecido como IAP com cal, é obtido pelo valor médio de amostras submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 7 dias. A argamassa é constituída de uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio, nove partes de areia normalizada e mais o

dobro do volume de hidróxido de cálcio de material pozolânico. A quantidade de água para a mistura deve corresponder a um índice de consistência de (225 ± 5) mm obtido no ensaio de abatimento, conforme prescreve a ABNT NBR 7215.

A cura dos corpos de prova é realizada nos próprios moldes durante 7 dias, sendo que durante as primeiras (24 ± 2) horas a cura deve ser feita a temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante as (144 ± 2) horas posteriores os corpos de prova são mantidos a temperatura de $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ nos próprios moldes e protegidos para evitar a perda da umidade. O resultado é a média dos resultados de resistência à compressão dos três corpos de prova.

5.5 Processo de fabricação de cimento

Segundo Gomides (1996) o processo de fabricação de cimento consiste em um processo físico-químico de transformação mineral, como calcário, argila, minério de ferro e areia em uma mistura de materiais sintéticos que possuem a capacidade de reagir com a água e desenvolver propriedades resistentes à compressão, a FIG. 3 ilustra o processo de fabricação de cimento.



Fonte: Nogueira, 2002, p. 13.

5.5.1 Extração de Matérias prima

A extração de minerais ou matérias-primas naturais consideradas primária, como: calcário calcítico e argila são realizados em jazidas ou minas, que geralmente estão localizadas próximas das fabricas facilitando as questões operacionais e de custos de produção, conforme ilustra a FIG. 4, esta etapa do processo é fundamental para a fabricação do clínquer, com ela se inicia todo o processo de verificação das composições físicas e químicas das matérias-primas (LOPES, 2009).

Figura 4 – Mineração de Calcário junto a fábrica de cimento



Fonte: Panorama, 2011

5.5.2 Armazenagem e pré-homogeneização

As matérias-primas, calcário, argila, areia e minério de ferro, coque de petróleo e bauxita, são armazenados separadamente em barracões e depois transportados para silos equipados com balanças dosadoras. Os técnicos analisam essas matérias-primas e determinam as dosagens de cada uma, baseado em parâmetros químicos pré-estabelecidos que dependem das características de composição apresentada pelas matérias-primas estocadas (DE PAULA, 2009). A FIG.5 ilustra um exemplo de armazenamento de matérias-primas em baias.

Figura 5 – Armazenagem de matérias-primas em baias



Fonte: Indústria cimenteira (2016).

5.5.3 Moagem da mistura

De acordo com documento da 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. A FIG. 6 apresenta um moinho de bolas utilizado para a moagem das matérias-primas.

Figura 6 – Moinho de bolas

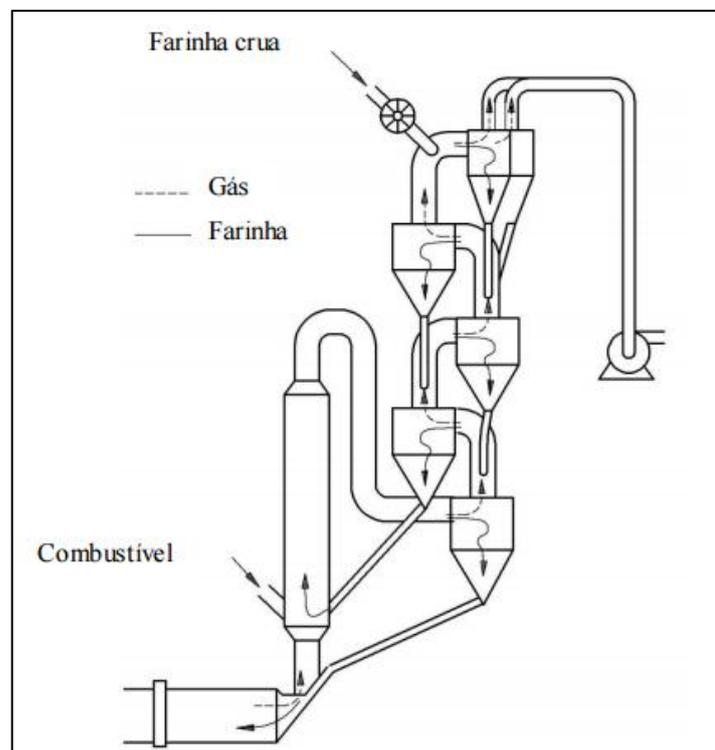


Fonte: Barbosa, 2011, p. 30.

5.5.4 Pré-aquecimento e Pré-calcinadores

De Paula, (2009) corrobora Kwech (1986), que o processo de pré-aquecimento e pré-calцинаção: a farinha crua pulverulenta é conduzida à torre de ciclones, FIG. 7, em um trajeto descendente é pré-aquecida gradativamente pelos gases quentes provenientes do forno, que estão com uma temperatura em torno de 1000 °C e se deslocam nas torres no sentido ascendente, contra o sentido da farinha crua. As reações químicas são iniciadas nesta fase, aonde as partículas da farinha chegam à temperatura de início da pré-calцинаção do CaCO_3 (Carbonato de Cálcio), por volta de 800 °C, nesta fase a calцинаção pode alcançar 50%, e em seguida a farinha passa pelo pré-calcinador que é um reator onde grandes quantidades da energia térmica são produzidas pela combustão de combustíveis, que atingem temperaturas na ordem de 800 a 1100 °C. Neste estágio aproximadamente 60% da quantidade total de combustível utilizado na produção do clínquer pode ser gasto para liberar 90% do CO_2 (Dióxido de carbono) presente na mistura crua e aumentar o grau de calцинаção em até 95% antes que a farinha entre no forno rotativo.

Figura 7 – Esquema de pré-aquecedor e pré-calcinador



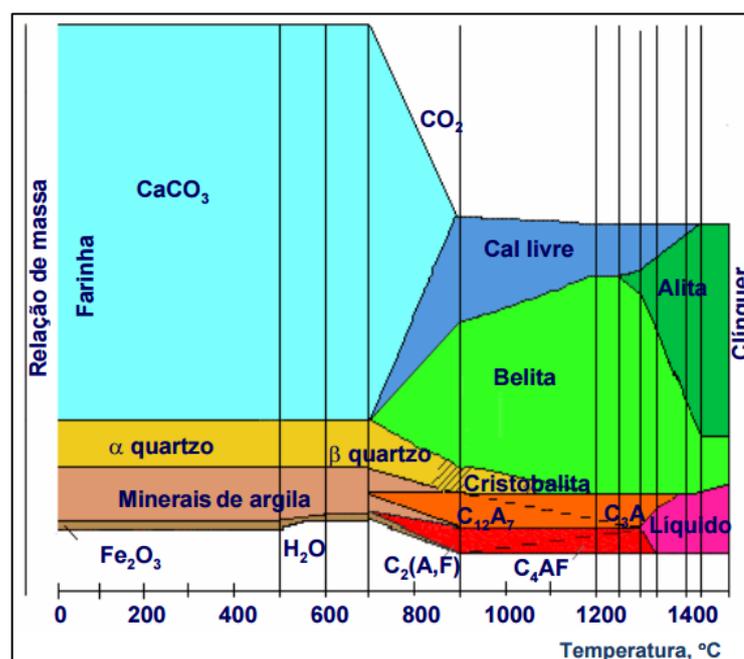
Fonte: De Paula, 2009, p.18.

5.5.5 Clinquerização

A clinquerização consiste no aquecimento controlado da mistura crua devidamente dosada e homogeneizada em forno apropriado a temperatura de 1450 °C, e constitui um conjunto de reações físico-químicas, a partir da mistura crua das matérias-primas, calcário e argila, tendo como produto final o clínquer, destas reações há a formação dos quatro componentes essenciais para a fabricação de clínquer: silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), acompanhados ainda por compostos menores como, CaO livre (CaO), Periclásio (MgO), sulfatos, sulfetos e outros (FOREINGN LAND, 2010).

Segundo documento da Foreign Land (2010), as reações que ocorrem são de estados sólidos, considerados fenômenos de difusão iônica entre sólidos, que é acelerada com o aparecimento de uma fase líquida, que se localiza na interface dos grãos e que começa a se formar à temperatura próxima de 1300 °C. A viscosidade de difusão e conseqüentemente, a capacidade de clinquerização estão relacionadas a quantidade e a viscosidade de fase líquida. A FIG. 8 apresenta as transformações químicas que acontecem durante o processo de clinquerização.

Figura 8 – Forno via seco com delimitações por zonas os quais define as etapas de reações que acontece durante o processo de queima



Fonte: Cárpio (2005).

5.5.6 Resfriamento do Clinquer

Este processo é importante para o término da reação química do clinquer, ao sair do forno com temperatura de aproximadamente 1100 °C, o clinquer passa por um resfriador onde é resfriado bruscamente para aproximadamente 90 °C, acontecendo nesta fase a estabilização, a decomposição dos cristais de Alita, a formação de belita secundária, o conteúdo de cal livre secundária e a formação do aluminato cálcico, sendo estes dois últimos componentes responsáveis pelos fenômenos de expansão no cimento. (DE PAULA, 2009).

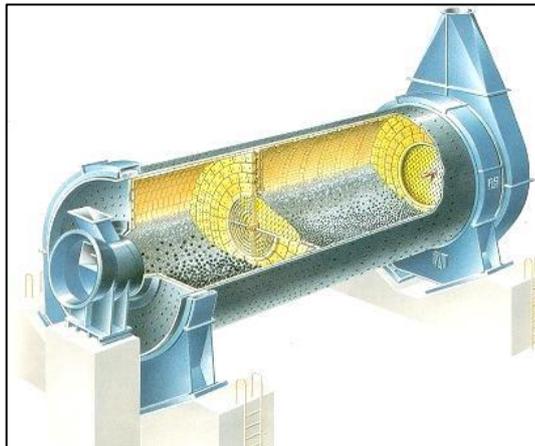
5.5.7 Moagem de Clinquer e Armazenagem do cimento

O cimento é resultado da moagem do componente principal do cimento, o clinquer mais sulfato de cálcio e aditivos (pozolanas, escórias de alto forno, calcário, etc.).

Na moagem destes materiais podem utilizar-se 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. (MILANEZ, 2009). A FIG.9 apresenta um moinho de bolas com 2 câmaras utilizado para moagem do clinquer junto às adições.

As proporções para a moagem dos materiais são bem definidas, de acordo com o controle de qualidade e de modo a respeitar as normas e especificações em vigor. O transporte do cimento após a moagem é normalmente realizado por via pneumática ou mecânica, e sua armazenagem é feita em silos ou armazéns horizontais. (DE PAULA, 2009).

Figura 9 – Moinho de cimento com 2 câmaras



Fonte: Barbosa, 2011, p.30.

5.5.8 Expedição

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

5.6 Controle de Qualidade exigidos para o cimento Portland pozolânico

Existem vários parâmetros de qualidade característicos do cimento Portland, geralmente especificados por normas que são exigidos pelo usuário ou consumidor final. Serão abordados os ensaios utilizados para atender as exigências químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland pozolânico CP IV 32.

5.6.1 Análises químicas

Neste tópico serão referenciadas algumas formas de determinações químicas das exigências da NBR 5736:1999, Perda ao Fogo, Anidrido Carbônico, Óxido de Magnésio e Trióxido de enxofre.

5.6.1.1 Perda ao fogo e Anidrido Carbônico (CO₂)

O ensaio de Perda ao fogo – NBR NM 18(ABNT, 2012), se faz pela diferença de pesagens de amostra de cimento Portland submetida à temperatura de 900°C a 1000°C em um cadinho de porcelana ou platina.

O ensaio de Anidrido Carbônico pode ser feito através da NBR NM 20 (ABNT, 2004), que tem como objetivo fazer o ensaio através de gasometria após a descarbonatação térmica, ou também através de aparelhos oferecidos ao mercado de cimento, ao qual detectam CO₂ através de células infravermelhos.

Estes ensaios representam a perda de massa do cimento após aquecimento, sendo uma parte dessa massa referente ao dióxido de carbono (CO₂) presente no calcário, servindo como parâmetro para estimar a proporção de adição de material carbonático na produção de cimento. Parte desta perda está também relacionada à água evaporada do gesso, se esse valor estiver alterado, pode indicar hidratação avançada do cimento. (PETRUCCI, 2005).

5.6.1.2 Óxido de Magnésio

Segundo Polari (2007) altos teores de óxido de magnésio (MgO) no clínquer podem ocasionar expansão e fissuras no concreto, pois é um composto químico de pequena reatividade inicial e se hidratam lentamente, diminuindo as resistências mecânicas dos concretos em longo prazo.

De acordo como Maringolo (2001), a formação de periclásio no clínquer acontece a partir de calcários magnesianos, geralmente quando os teores de MgO ultrapassam o teor de 2 %, podendo se formar também através dos grãos grossos de calcário dolomítico na farinha ou ainda devido a incorporação de refratários cromo-magnesianos no clínquer Portland.

5.6.1.2.Trióxido de enxofre (SO₃)

Na fabricação do cimento o clínquer recebe certa quantidade de gesso (CaSO₄, 2H₂O), com o objetivo de regular o tempo de pega, mas ele também influi em outras características do cimento, como retração e resistência a compressão,

fazendo com que a operação de dosagem de gesso seja de extrema importância. (CEFET,2004).

O trióxido de enxofre pode ser determinado através do ensaio determinado pela NM 16 (ABNT, 2004), Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico ou também por aparelhos, como equipamentos da LECO, ao qual detectam Enxofre através de células de infravermelho.

5.6.2 Análises Físicas e Mecânicas

Neste tópico serão referenciados ensaios para determinação das características e propriedades físicas e mecânicas exigidos pela NBR 5736:1999.

5.6.2.1 Finura

A operação final do processo de fabricação do cimento Portland é a redução do clínquer e demais materiais adicionados em um pó ultrafino de elevada superfície específica, aumentando a superfície de contato das partículas com a água durante o processo de hidratação. No processo de moagem de cimento, várias partículas são diminuídas simultaneamente com ações complexas das forças mecânicas, tendo a finura, a distribuição granulométrica e o tamanho médio das partículas, importância vital para o comportamento reológico e desempenho mecânico do cimento (ABCP, 2000).

Existem duas metodologias para a determinação da finura do cimento:

- NBR 11579 (ABNT, 2012) – Determinação de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)

O ensaio consiste em determinar a percentagem retida da amostra de cimento em uma peneira com abertura de malha de 0,0075 mm. Pesa-se uma amostra de 20 gramas, coloca-se está sobre a peneira esse inicia o peneiramento mecanizado por 3 minutos. O índice de finura é dado pela equação (3).

$$\text{Finura (\%)} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right) \times f_c \times 100 \quad (3)$$

Em que:

Finura = será o resultado da finura, (%);

m_1 = massa inicial (g);

m_2 = massa retida na peneira (g);

f_c = fator de calibração da peneira.

- NBR NM 16372 (ABNT, 2015) – Determinação de finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine):

Determina a área específica pelo tempo de passagem de certa quantidade de ar através de uma porção de cimento, demonstra principalmente a uniformidade da moagem de uma fábrica de cimento. Este método baseia-se no tempo que determinada quantidade de ar necessita para atravessar uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas (IFRS – INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL). A superfície específica do cimento é expressa em cm^2/g ou m^2/Kg , e determinada conforme equação (4).

$$S = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon}^3}{(1-\varepsilon)} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1 \cdot \eta}} \quad (4)$$

Onde:

S é a superfície específica do cimento (cm^2/g)

ε é a porosidade da camada ($\varepsilon = 0,5$ para as condições para NBR NM 16372;

t é o tempo medido (s);

ρ é a massa específica do cimento (g/cm^3)

K é a uma constante que depende do aparelho utilizado no ensaio;

η é a viscosidade do ar a temperatura do ensaio (Pa.s).

5.6.2.2 Tempo de Pega

Segundo Bauer (2011), a pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas a um processo químico de hidratação. É um

fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire alguma consistência que a torne imprópria a um trabalho.

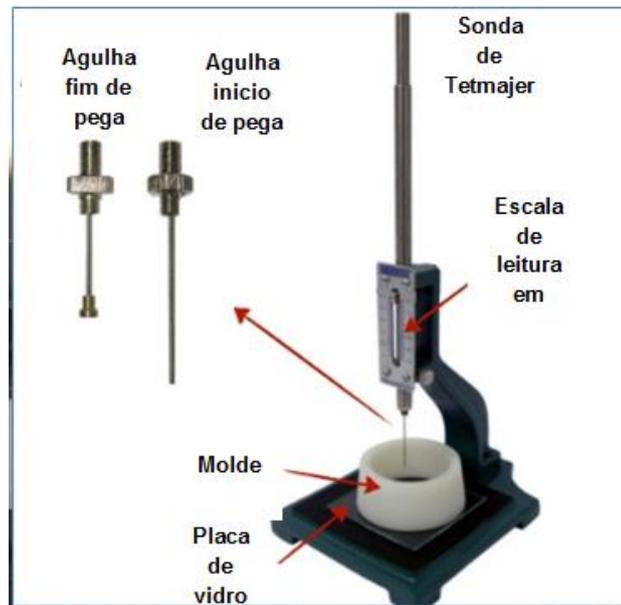
O início de pega consiste no intervalo entre a mistura do cimento com a água e o início do endurecimento da pasta de cimento e ocorre quando os cristais importantes para o ganho de resistência começam a se formar, por isso cimento deve ser aplicado antes desse prazo. O fim de pega indica que a pasta de cimento já se solidificou. (ITAMBÉ, 2010).

De acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003), define início de pega, em que condições normalizadas de ensaios, o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água e cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetre na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base, já para o fim de pega define que este tempo ocorre quando a agulha estabiliza a 0,5 mm da pasta.

O primeiro passo para realização deste ensaio consiste em produzir uma pasta normalizada, que é definida como Pasta normal, para isso se utiliza como referência a NBR NM 43 (2003) – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. A fabricação da pasta consiste em pesar $(500 \pm 0,1)$ g de cimento e por tentativas são adicionadas quantidades de água até que a pasta ofereça uma resistência a penetração a sonda normalizada (10 mm de diâmetro) aplicada pelo aparelho de Vicat (FIG. 10). Considera-se que a pasta é de consistência normal se a sonda penetrar na pasta até uma distância de 6 ± 1 mm.

A leitura do início de pega se dá em fazer leituras em intervalos de tempo sucessivos com o aparelho de Vicat junto a agulha de Vicat, até que a mesma não mais atravessasse a pasta até o fundo, ficando a 4 ± 1 mm da base. O fim de pega é feito como agulha parecida provida de um anel com cinco mm de diâmetro, o fim de pega se dá quando a agulha colocada sobre a superfície da pasta deixa sua marca, sem que o anel deixe sua marca, ou seja, a agulha penetrou menos que 0,5 mm.

Figura 10 – Aparelho de Vicat e seus acessórios



Fonte: Grubba, (2015).

5.6.2.3 Expansibilidade a quente

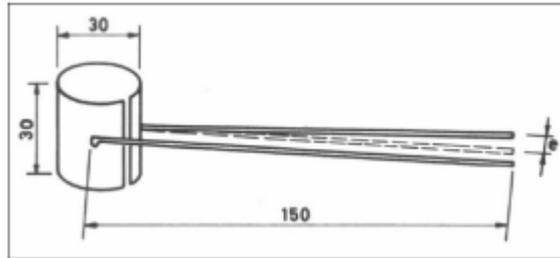
A reação química entre o cimento e a água produz inicialmente na pasta um estágio plástico e a seguir o estágio sólido. Estas reações provocam ligeiras mudanças no volume da pasta de cimento, então, o volume absoluto do cimento mais o volume da água adicionada, quando misturados inicialmente, não é rigorosamente o mesmo que aquele que a pasta apresenta após certo tempo de hidratação, este volume final pode ser até 6% menor que o inicial, dependendo das condições sob as quais se desenvolve a hidratação. (ABCP, 2000)

Ainda segundo a ABCP (2000), nos cimentos denominados anormais, além da redução de volume descrita, pode existir simultaneamente um aumento considerável da pasta. Este aumento de volume não somente anula a contração, mas pode dar origem a um volume final ainda maior que o inicial, com conseqüente indução de tensões internas, podendo gerar desde trincas superficiais até uma desagregação completa da massa de pasta.

Para medir esta expansibilidade fabrica-se uma pasta idêntica a utilizada para determinar o tempo de pega, onde a mesma é colocada em três agulhas de *Le Chatelier*, FIG. 11. A agulha de *Le Chatelier* consiste de um cilindro com 30 mm de diâmetro e 30 mm de altura, em chapa de latão, de 0,5 mm de espessura, fendido segundo uma geratriz, a cada lado da fenda, deve ser soldado uma haste do mesmo

material, com 150 mm de comprimento e extremidade em bisel (NBR 11582, ABNT 2016).

Figura 11 – Agulha de Le Chatelier



Fonte: Materiais de construção (2006).

Depois de cheio com a pasta, a agulha é coberta com duas placas de vidro e comprimido por um contrapeso, sendo o conjunto (agulha, corpo-de-prova, placa de vidro e contrapeso) mantido dentro de um tanque de água potável, mantida a uma temperatura de (23 ± 2) °C, durante (20 ± 4) horas. Após o período de cura inicial, as placas de vidro são retiradas e as agulhas de *Le Chatelier* devem ser colocadas em um recipiente cheio de água a (23 ± 2) °C, deixando as extremidades das hastes para a fora da água, realizando o aquecimento da água até a ebulição. Os afastamentos das extremidades das agulhas, em milímetros devem ser medidos imediatamente antes do início do aquecimento da água, após três horas de aquecimento e de duas em duas horas até que não se verifique em duas medições consecutivas variações de afastamento. (NBR 11582; ABNT 2016).

5.6.2.4 Resistência à compressão

A estrutura de concreto de um edifício é o conjunto de elementos, que suporta cargas e as transmitem ao solo. A ideia de estrutura está sempre associada ao conceito de resistência, ou seja, que os componentes da estrutura se oponham e não cedam à ação das solicitações: o peso das pessoas, dos moveis, das maquinas, a pressão da água, etc. O cimento é o componente que confere ao concreto a característica de desenvolver resistência. (ABCP, 2000).

A NBR 7215 (ABNT, 1996) descreve o método de ensaio, que consiste na preparação de corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos-de-prova são feitos com uma argamassa composta de quatro partes de areia normalizada em massa e uma relação de água/cimento de 0.48, a

TAB. 5 apresenta a quantidade necessária dos componentes utilizados para composição da argamassa suficiente para moldagem de 6 corpos de prova. Esta argamassa é preparada por meio de um misturador e compactada manualmente.

Tabela 5 – Materiais componentes para composição da argamassa

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: NBR 7215 (ABNT, 1996).

Para a cura inicial os corpos-de-prova são curados em câmara úmida com atmosfera controlada, após a cura inicial os corpos-de-prova são desmoldados e submetidos a cura em água saturada de cal até a data da respectiva ruptura. Os corpos-de-prova são submetidos a um carregamento em máquina de compressão até se romperem. A força empregada para ruptura determina a capacidade do cimento em suportar carga, esta força é expressa em resistência (MPa).

A ABCP em seu último Guia de Básico de Utilização do Cimento Portland (2016), divulga a evolução média da resistência à compressão dos cimentos pozolânicos brasileiros em função da idade (TAB. 6).

Tabela 6 - Evolução média da resistência à compressão do CP IV 32 brasileiro.

Resistência (MPa)	CP IV 32
1 Dia	12,2
3 Dias	21,8
7 Dias	28,7
28 Dias	40

Fonte: Adaptado ABCP (2016).

5.7 Fluorescência de raios X (FRX)

Segundo Ratti (2013), os raios-X foram descobertos por Wilhelm Roentger, em 1895. Quando a radiação incide em matéria, acontecem fenômenos e o feixe é atenuado, tanto por absorção, como por espalhamento, sendo a primeira mais significativa e cresce com o número atômico da substância, fazendo com que materiais heterogênicos apresentem diferentes atenuações em função do número atômico médio das diferentes áreas irradiadas.

Segundo Silva (2011. p. 23), “a análise por fluorescência de raios X consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos e detecção medida dos raios X característicos, cujas energias são específicas para cada elemento”.

De acordo com Ratti (2013), a FRX é um método analítico rápido e não destrutivo, com um processo de amostras simples, e pode ser utilizado para determinação química de materiais em geral.

5.8 A Indústria Cimenteira no Brasil, seus custos e impactos ambientais

O Brasil é um país com dimensões continentais, tendo 7 mil quilômetros de costa marítima, fronteiras com 10 países diferentes e uma área de 8,5 mil quilômetros quadrados. Dentro deste cenário que a indústria brasileira de cimento começou a se desenvolver-se, primeiro em São Paulo, em 1926, e depois no Rio de Janeiro. No início do século XX, teve um início tímido, passando as importações somente em 1933, com isso a indústria brasileira iniciou um processo consistente de consolidação e crescimento. (KIHARA; VISEDO, 2014).

Na década de 70, o consumo per capita de cimento passou de 100 para 227 Kg por habitante e no mesmo período houve a triplicação da produção, de 9 para 27 milhões de toneladas anuais, devido aos inúmeros projetos habitacionais e de infraestrutura da época, tal período ficou conhecido como “milagre econômico”, para isso foram instaladas 24 novas fábricas. (KIHARA; VISEDO, 2014).

De acordo com os dados do Cimento.Org (2015), o mercado de cimento no Brasil é atualmente composto por 22 grupos cimenteiros, com 95 plantas produzindo (setembro de 2015), com 31 marcas diferentes de cimento espalhadas por 24

estados, tendo participações, tanto de grupos nacionais, como estrangeiros. A capacidade estimada de produção é de aproximadamente 96 milhões de toneladas/ano.

A indústria brasileira de cimento atualmente vive seu primeiro ano de retração nas vendas e no consumo desde 2004, a expectativa do setor é que a queda na demanda, decorrente do esfriamento da economia do país, será no patamar de dois dígitos. Sem uma reversão do cenário no curto e médio prazo, até o fim de 2016 a previsão é que as cimenteiras vão enfrentar dois anos de decréscimo nas vendas (CIMENTO.ORG, 2015).

5.8.1 Custos

Segundo Well (1990) o custo de um produto é o gasto econômico que representa a fabricação desse produto ou a prestação de um serviço.

O preço de venda é calculado a partir desse custo de produção somado ao lucro que se almeja, este custo de produto é composto pelo preço da matéria-prima, o preço da mão de obra direta utilizada na produção, o preço da mão de obra indireta representada pelos funcionários que realizam a parte administrativa da empresa e o custo de amortização dos equipamentos envolvidos como terreno, localização física entre outros. O custo de produção do cimento apresenta variações dependendo principalmente da capacidade de produção da unidade industrial e do tipo de cimento fabricado. As adições utilizadas no cimento, como escória de alto forno ou cinzas pozolânicas, faz com que a produção do cimento apresente um menor custo (GALHARDO, 2014 apud ROCHA, 2010).

Segundo Galhardo (2014), os custos de produção variam de acordo com a vida útil de cada fábrica, o tipo de processo, a capacidade de produção e outros. A variação destes custos está entre U\$\$ 27,50/t para uma fábrica de grande porte, a U\$\$ 50/t para fabricas antigas que fabricam o cimento pelo processo úmido. Os elementos do custo são a supervisão e mão de obra, matéria-prima adquirida, combustível, eletricidade, peças, manutenção, impostos e outros. O custo de recuperação do capital investido para uma fábrica moderna de baixo custo operacional, adicionam U\$ 15/t aos custos operacionais. As margens são muito apertadas, em relação aos preços recentes, quando os custos corporativos de

“overhead” e custos de vendas são incluídos. A classificação dos custos podem ser em fixos ou variáveis.

5.8.2 Impactos ambientais causados pela indústria cimenteira

Segundo Camões (2005), a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 7% das emissões artificiais totais de CO₂ na atmosfera, isso se deve principalmente à grande quantidade de energia necessária para elevar a temperatura dentro dos fornos rotativos a aproximadamente 1450 °C, que é necessária para a reação de clinquerização e também, devido ao processo da calcinação das matérias-primas, que gera CO₂.

Segundo Sachs (1995), os poluentes primários emitidos no processo de fabricação de cimento são: material particulado, dióxido de carbono, óxidos e enxofre. As características tecnológicas e operacionais do processo industrial do cimento, da composição química e mineralógica das matérias-primas, a composição química dos combustíveis empregados, a marcha operacional dos fornos de clinquer e da eficiência dos sistemas de controle de emissão de poluentes instalados, determina os níveis e as características das emissões dos poluentes.

De acordo com De Paula (2009), a indústria de cimento vem fazendo grandes esforços para amenizar esse quadro, através de pesquisas científicas e novas tecnologias, que vêm sendo desenvolvidas e implementadas visando à economia de energia, redução de emissões poluentes, e ainda melhorando a qualidade do produto e reduzindo os custos de produção. O cimento comum já é misturado com outros materiais e resíduos de outras cadeias produtivas, como cinzas volantes e escória de alto forno, para produção de cimentos compostos para sustentar uma gama extensiva de aplicações na construção civil.

A utilização da escória como material aglomerante elimina a etapa de calcinação da matéria-prima utilizada para a produção do clinquer, o que proporciona a redução do consumo de energia e do custo da produção do cimento. O Brasil é um grande produtor de escória de alto-forno, mas somente uma parcela de escórias básicas é consumida na forma de adição na produção de cimento. Já a escórias ácidas, produzidas por altos-fornos a carvão vegetal, ainda constituem resíduos que se acumulam em usinas. (JONH, 1995).

Os destinos dos resíduos siderúrgicos é um problema mundial sob aspecto ecológico. O fato da escória de alto-forno a carvão vegetal utilizar uma fonte renovável de energia (eucalipto), com o reflorestamento de grandes áreas proporciona um aspecto favorável para o desenvolvimento deste produto (MASSUCATO, 2005).

6 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa realizada neste trabalho pode ser classificada, quanto à natureza, como pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimento e solucionar problemas específicos de reaproveitamento de subprodutos industriais e verificação de novos fornecedores de matéria-prima.

Quanto aos objetivos é uma pesquisa explicativa, pois busca descobrir a possibilidade da utilização da escória ácida, para a produção de Cimento Portland Pozolânico, quanto aos procedimentos é uma pesquisa experimental, pois tem um objetivo de estudo e as variáveis que o influenciam serão selecionadas, como também suas formas de controles.

Quanto à forma de abordagem, é quantitativa, pois requer o uso de técnicas estatísticas e verificação do atendimento as normas exigidas pela ABNT, e quanto ao local de realização é campo, pois será feita em Laboratório de fábrica de cimento.

Por outro lado, é também qualitativa, por que uma vez que assume diferentes significados no campo das ciências, compreendendo um conjunto de diferentes técnicas interpretativas que visam a descrever e a decodificar a qualidade da escória ácida, e produtos provenientes de sua utilização.

6.1 Local do estudo

O trabalho foi realizado em uma indústria cimenteira situada no município de Arcos, no centro-oeste de Minas Gerais. Sua população estimada para o ano de 2015 foi de 39.249 habitantes, com uma densidade demográfica aproximada de 71,78 (hab./Km²). (IBGE, 2016).

6.2 Escolha da amostra

Para a realização do presente trabalho, o primeiro passo foi verificar se a escória ácida possuía atividade pozolânica, verificando através da análise química dos óxidos (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) e do IAP - Índice de Atividade Pozolânica, através dos ensaios especificados pelas normas ABNT NBR 5751:2012 (Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal) e

pela ABNT NBR 5752:2014 (Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento aos 28 dias).

O segundo passo foi à caracterização química e física das matérias-primas que foram utilizadas no desenvolvimento do cimento Portland pozolânico (Clinker, Gesso, Calcário e também a escória ácida).

O terceiro passo foi à moagem das matérias-primas em moinho piloto de laboratório para compor as cinco amostras de cimento Portland pozolânico e por fim o último passo foi verificar se amostras de cimentos desenvolvidos atendiam as exigências químicas e físicas especificadas na ABNT NBR 5736:1999 (Cimento Portland Pozolânico).

A amostra de escória utilizada foi coletada em uma empresa de beneficiamento situada em Divinópolis, Minas Gerais, a mesma faz a captação de escórias de pequenas usinas da região metropolitana de Belo Horizonte.

As outras amostras (Clinker, Gesso e Material carbonático) que fizeram parte da composição das amostras dos cimentos Portland Pozolânico, foram coletadas na própria empresa onde o estudo foi realizado. A FIG. 12 ilustra as matérias-primas utilizadas para a fabricação dos cimentos pozolânicos.

Figura 12 – Matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento



Fonte: Autor (2016).

6.3 Coleta de dados

Os dados desta pesquisa foram obtidos por preparação e caracterização das amostras selecionadas, tanto antes e após a moagem das matérias-primas, através da determinação de IAP do material pozolânico, técnica analítica de fluorescência de raios X (FRX), determinação de finura e área específica, de resíduo insolúvel, ensaio de início e fim de pega, determinação de resistência à compressão, massa específica.

6.3.1 Determinação da Atividade pozolânica da escória ácida

Para a determinação da atividade pozolânica, foram utilizadas as normas NBR 5751 (ABNT, 2012) – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal – Método de ensaio, este ensaio consiste em determinar a resistência a compressão de corpos-de-prova feitos com uma argamassa proveniente da mistura de hidróxido de cálcio e o material pozolânico.

Para o preparo da argamassa suficiente para moldagem de 3 corpos-de-prova, foram utilizados 104 gramas de hidróxido de cálcio P.A, da marca Dinâmica, que atendia as exigências de qualidade da respectiva norma. Utilizado também 234 gramas de cada fração de areia, nº 16, 30, 50 e 100. Para a escória foram utilizadas 268 gramas, valor este encontrado através da equação (5). A FIG. 13 ilustra o hidróxido de cálcio

Figura 13 – Hidróxido de Cálcio



Fonte: Autor (2016)

$$M_{\text{poz}} = 2 \times \left(\frac{\delta_{\text{poz}}}{\delta_{\text{cal}}} \right) \times 104 \quad (5)$$

Onde:

δ_{poz} e δ_{cal} são respectivamente os valores de massas específicas do material pozolânico e do hidróxido de cálcio, determinados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2001).

Os corpos-de-prova, primeiramente foram curados durante 24 horas, a 22 °C em câmara úmida, da marca Ethik, e depois por mais 144 horas, em estufa, da marca Shimadzu, a 55 °C, a FIG. 14, apresenta a fase final de cura.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012), para o material ser considerado pozolânico a média de resistência a compressão dos 3 corpos-de-prova deve ser maior que 6 MPa, A FIG. 15 demonstra os 3 corpos de prova aguardando para serem rompidos.

Figura 14 – Cura dos corpos de prova em estufa



Fonte: Autor (2016).

Figura 15– Corpos de prova para teste de pozalinidade



Fonte: Autor (2016).

Utilizada também para a determinação da atividade pozolânica, a NBR 5752 – Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, para a preparação das 2 argamassas foram utilizados o cimento CP II F 32, da marca Itambé, a TAB. 7, apresenta as características químicas e físicas deste cimento fornecidas pela Itambé. Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida da marca Ethik durante os 28 dias até o rompimento.

Tabela 7 - Qualidade química e física do CP II F 32

CP II F 32		
Característica		
% CaO		60,83
% SiO ₂		18,64
% Al ₂ O ₃		4,27
% MgO		4,02
% SO ₃		2,73
Expansibilidade a quente (mm)		0,25
Início de pega (h:min)		3:59
Fim de pega (h:min)		04:44
	1 dia	14,1
Resistência à compressão	3 dias	29,7
	7 dias	36
	28 dias	43,2

Fonte: Itambé (2016).

De acordo com a NBR 5736 (ABNT, 1999) a atividade pozolânica determinada conforme a NBR 5752 deve ser no mínimo de 75%.

6.3.2 Resíduo Insolúvel

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.

Para determinação de Resíduo Insolúvel tanto dos cimentos desenvolvidos, quanto da escória ácida, foi seguido o seguinte método: Inicialmente, pesou-se 1,0000 g ± 0,0100 g da amostra, transferindo-a para um béquer de 250 ml,

adicionando-se 100 ml de água e introduzindo no béquer uma barra magnética, com auxílio de um agitador magnético, agitou a solução por 2 minutos. Logo após, adicionado 100 ml de solução de ácido clorídrico 1:25 e continuou-se agitando por mais 30 minutos, filtrou a solução em papel de filtração média e lavar oito vezes com solução de ácido clorídrico 1:50. Transferindo-se o papel filtro para um cadinho de platina previamente tarado e calcinar a amostra mais cadinho em forno mufla entre 900°C e 1000°C por 20 minutos. O percentual de resíduo insolúvel se dará pela equação (6).

$$R. I. \% = \left(\frac{m_2 - m_1}{m} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

R.I % = percentual de resíduo insolúvel;

m = massa da amostra a ser ensaiada;

m₁ = massa do cadinho;

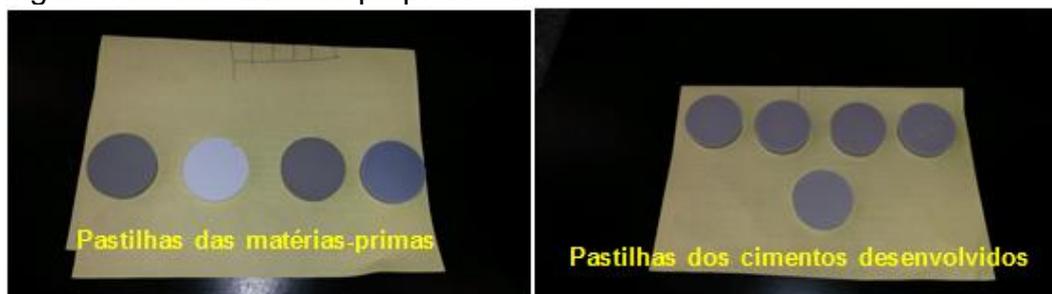
m₂ = massa do cadinho mais amostra após calcinação.

6.3.3 Composição química

A determinação da composição química das matérias-primas e do cimento desenvolvido foram realizadas através da técnica analítica de fluorescência de raios X (FRX).

As amostras a serem ensaiadas pela técnica de FRX primeiramente foram pulverizadas em moinho de panelas, logo após, foram compactadas com uma pressão de 200 KN em uma prensa da marca Herzog, onde se formaram pastilhas, conforme ilustra a FIG. 16.

Figura 16 – Pastilhas de pó prensado



Fonte: Autor (2016).

Em seguida foi determinada a composição química das matérias-primas por FRX através de um espectrômetro de raios X da marca Panalytical, modelo Axios. A FIG. 17 apresenta o equipamento citado.

Figura 17 – Aparelho de fluorescência de raios X.



Fonte: Autor (2016).

6.3.4 Desenvolvendo o cimento em laboratório

Após a caracterização das matérias-primas, foram criadas cinco receitas para a produção do cimento Portland pozolânico da seguinte forma: proporção da adição de calcário e gesso em 3% para todas as receitas, utilizando este valor para atendimento as exigências químicas, pois o calcário é a fonte de CO_2 e o gesso a fonte de SO_3 , e alterando a proporção de escória em 30, 35, 40, 45 e 50%, conseqüentemente o clínquer foi alterado conforme a escória era alterada. A TAB. 8 demonstra como ficaram em percentual as receitas das cinco amostras a serem compostas.

Tabela 8 - Receitas utilizadas para composição das amostras de cimento (%)

Possibilidades de Adição – Receitas					
Matéria-prima	Cimento 1 30% Escória	Cimento 2 35% Escória	Cimento 3 40% Escória	Cimento 4 45% Escória	Cimento 5 50% Escória
Clinker	64,0	59,0	54,0	49,0	44,0
Escória Ácida	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
Gesso Natural	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Calcário	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Fonte: Autor (2016).

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 (FIG. 18).

Figura 18 – Moinho de corpos moedores



Fonte: Autor (2016).

Foi estipulada para a moagem das matérias-primas, uma massa total de aproximadamente 8 Kg para cada receita. A TAB. 9 demonstra a quantidade em massa de cada receita.

Tabela 9 - Quantidade em massa das receitas

Possibilidades de Adição (Kg) – Receitas					
	Cimento 1 30% Escória	Cimento 2 35% Escória	Cimento 3 40% Escória	Cimento 4 45% Escória	Cimento 5 50% Escória
Clinker	5,10	4,70	4,30	3,90	3,50
Escória Ácida	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00
Gesso Natural	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Calcário	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24

Fonte: Autor (2016).

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 a massa definida na TAB. 8 e posteriormente cada receita foi pré-homogeneizada em sacos plásticos (FIG. 19 e 20).

Figura 19– Matérias-primas pesada



Fonte: Autor (2016)

Figura 20 – Homogeneização das matérias-primas



Fonte: Autor (2016).

Para verificar a eficiência da moagem, foi estipulada uma área específica (Blaine) que ficasse entre 4600 g/cm^2 a 4700 g/cm^2 . 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, utilizada uma balança analítica (quatro casas decimais) da marca, Sartorius. A FIG. 21 apresenta os equipamentos utilizados.

Figura 21 – Permeabilímetro de Blaine (a) e balança analítica (b)



Fonte: Autor (2016).

6.3.5 Ensaio para a verificação das exigências químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland pozolânico desenvolvido no laboratório

Após o desenvolvimento das cinco amostras de cimento, elas passarão por análises para verificar o atendimento ou não as exigências químicas, físicas e mecânicas citadas na ABNT NBR 5736:1999. A TAB. 10 apresenta as exigências químicas e a TAB. 11 apresenta as exigências físicas e mecânicas.

Tabela 10 - Exigências químicas

Determinações Químicas	Limite (% da massa)
Perda ao Fogo (PF)	≤ 4,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 3,0

Fonte: ABNT NBR 5736:1999.

Tabela 11 - Exigências físicas e mecânicas

Características e propriedades	Unidade	Limites	
		CP IV - 25	CP IV - 32
Finura (resíduo na peneira 75 µm)	%	≤ 8,0	≤ 8,0
Tempo de início de pega	h	≥ 1	≥ 1
Expansibilidade a quente	mm	≤ 5	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 8
	7 dias de idade	MPa	≥ 15
	28 dias de idade	MPa	≥ 25

Fonte: ABNT NBR 5736:1991

6.3.6.1 Ensaios para verificação das exigências químicas

Abaixo são descritos os ensaios químicos e equipamentos utilizados para verificação da qualidade química exigida pela NBR 5736:1999, para os cimentos Portland pozolânico desenvolvidos no laboratório.

6.3.6.2 Determinação de Perda ao fogo – ABNT NBR NM 18:2012

O procedimento para a determinação consistiu em pesar $1,0000 \pm 0,0010$ g de material em um cadinho de platina previamente calcinado por 15 minutos a 1000°C e tarado em uma balança analítica (quatro casas decimais), logo após o cadinho junto a amostra foi levado a um Forno Mufla da marca JUNG, e calcinado por aproximadamente 1 hora. Após este processo de calcinação a amostra é esfriada em dessecador. A FIG. 22 ilustra o forno Mufla utilizado para o ensaio.

Figura 22 – Forno Mufla



Fonte: Autor (2016).

A porcentagem de Perda ao fogo é determinada pela equação (7):

$$\text{Perda de fogo} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

m = massa da amostra utilizada no ensaio (g).

m_1 = massa do cadinho mais a amostra a ser ensaiada (g).

m_2 = massa do cadinho mais a amostra a ser ensaiada após a calcinação (g).

6.3.6.2 Óxido de Magnésio

Para determinação do óxido de magnésio (MgO), utilizou-se a técnica analítica de Fluorescência (FRX), citada no item 6.3.3 – Composição química.

Foram analisados também outros elementos para fim de conhecimento, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O e K₂O.

6.3.6.3 Trióxido de enxofre (SO₃) e Anidrido Carbônico (CO₂)

As análises de Trióxido de enxofre (SO₃) e Anidrido Carbônico (CO₂) foram realizadas em forno de indução da fabricante LECO, modelo SC-144 DR, o mesmo opera com a absorção de infravermelho, a FIG. 23 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 23 – Forno de indução LECO



Fonte: Autor (2016).

6.3.7 Ensaios para verificação das exigências físicas e mecânicas

Neste tópico foram citadas as formas e equipamentos utilizados para verificação das características e propriedades físicas/mecânicas das amostras de cimento Portland pozolânico desenvolvidas no laboratório.

6.3.7.1 Determinação de Finura por peneirador dinâmico – ABNT NBR 12826:2014

A NBR 5736 (ABNT, 1999), faz exigências para finura somente para a peneira de 75 µm, 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 (duas casas decimais) da marca Shimadzu, 10 gramas da amostra a ser ensaiada e adicionada na peneira. Com o peneirador aerodinâmico ajustado a um vácuo de 200 mm/H₂O e determinado um tempo de 3 minutos de peneiramento. A FIG. 24 apresenta o peneirador utilizado para o ensaio de finura.

Figura 24 – Peneirador aerodinâmico.

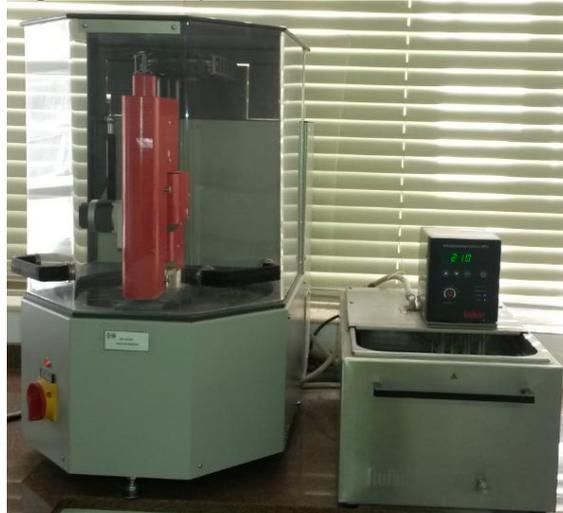


Fonte: Autor (2016).

6.3.7.2 Determinação do Tempo de pega – ABNT NBR 65

O tempo de pega do foi determinado conforme prescreve a NBR 65 (ABNT, 2003), utilizando-se para isso, um aparelho de Vicat automático da marca Toni Technik (FIG. 25). O mesmo faz a leitura 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 (FIG. 26).

Figura 25 – Aparelho de Vicat Automático



Fonte: Autor (2016).

Figura 26 – Tela de resultados do Vicat Automático



Fonte: Autor (2016).

6.3.7.3 Determinação de expansibilidade a quente – ABNT NBR 11582:2012

A expansibilidade a quente foi determinada conforme prescreve a NBR 11582 (ABNT, 2012), foram confeccionados três corpos-de-prova para cada amostra de cimento criada em laboratório, os mesmos foram curados em câmara úmida da marca Ethik, e para o aquecimento foi utilizado um aparelho de banho-maria, da marca QUIMIS, FIG. 27. O resultado se dá pela média da medição do três corpos-de-prova.

Figura 27 – Ensaio de expansibilidade a quente



Fonte: Autor (2016).

6.3.7.4 Determinação da resistência à compressão – ABNT NBR 7215:1996

Para verificar a resistência a compressão das cinco amostras de cimentos Portland pozolânicos criadas no laboratório, foram seguidas as instruções prescritas na NBR 7215 (ABNT, 1996) – Determinação da resistência a compressão. Foram moldados para cada amostra de cimento desenvolvida no laboratório 16 corpos-de-prova, quatro para cada idade (1, 3, 7 e 28 dias).

Para a preparação das argamassas foram utilizadas argamassadeiras da marca Solotest, que atende o que NBR 7215 solicita (FIG. 28). As formas cilíndricas também são da marca Solotest e também respeita as exigências da norma, (FIG. 29).

Figura 28– Misturador mecânico Solotest



Fonte: Autor (2016).

Figura 29 – Compactação da argamassa



Fonte: Autor (2016).

Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida da marca Ethik até o momento das suas respectivas rupturas, (FIG.30)

Figura 30 – Corpos-de-prova sendo curados em água saturada



Fonte: Autor (2016).

Para o rompimento dos corpos-de-prova foi utilizada uma máquina de compressão da marca Toni Technik, modelo 2020 com uma carga contínua e velocidade constante, a FIG. 31 registrou o momento da ruptura de um dos corpos-de-prova.

Figura 31– Rompimento de corpo-de-prova



Fonte: Autor (2016).

6.3.8 Avaliação do custo da escória ácida utilizada para a produção do CP IV 32

A escória que se consome hoje na empresa, possui características básicas, diferente da escória utilizada neste estudo, que possui características ácidas. Tornando-a não tão interessante como adição para a produção do cimento produzido em escala industrial pela empresa, o cimento composto CP II E 32, ao qual possui especificações diferentes a do cimento Portland pozolânico, a NBR 11578 (ABNT, 1991), ao qual determina as exigências para o CP II E 32, determina a adição máxima de 34% de escória e o teor de Resíduo Insolúvel em menor que 2,5%, limitando assim a utilização de escória ácida, pois a mesma possui elevados teores de Resíduo Insolúvel.

Devido a não possibilidade de acesso a outros componentes do custo da produção do cimento, foi realizado somente a comparação do custo das matérias-primas utilizadas na produção do cimento CP II E 32, com o custo das matérias-primas utilizadas nas composições do CP IV 32 produzidos no laboratório, focando mais a comparação entre as escórias.

Para se ter uma ideia da diferença de custo dos dois produtos, foi simulada uma receita para o CP II E 32, em que teve em sua composição as mesmas adições de material carbonático e gesso utilizados para a produção do CP IV 32, 3%, e utilizando o máximo da escória básica permitido pela NBR 11578:1991, 34%, restando 60% de clínquer. Essa simulação gerou um custo X do CP II E 32, ao qual foi comparado através da diferença percentual com as 5 amostras compostas em laboratório.

6.4 Método de análise

Os dados foram trabalhados e compilados por meio de planilhas eletrônicas e gerados gráficos para uma melhor visualização dos resultados.

7 ANÁLISES E RESULTADOS

Serão evidenciados os resultados e discussões relacionados a escória ácida e as cinco composições de cimento tipo CP IV 32 criadas no laboratório, focando em análises químicas, físicas e mecânicas e relacionando o custo da escória básica utilizada pela empresa com a escória ácida em estudo.

7.1 Caracterização da escória ácida

Os resultados das análises químicas da escória ácida realizadas no laboratório da cimenteira, estão descritos no TAB. 12, onde se encontra os valores para Dióxido de Silício (SiO_2), Óxido de cálcio (CaO), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Óxido de ferro (Fe_2O_3), Óxido de Magnésio (MgO), Dióxido de carbono (CO_2), Trióxido de enxofre (SO_3) e Resíduo Insolúvel (RI)

Tabela 12 - Resultados das análises químicas da escória ácida

Identificação da amostra	Característica química	Resultados (%)
Escória Ácida	SiO_2	47,26
	CaO	24,23
	Al_2O_3	14,02
	Fe_2O_3	5,12
	MgO	5,03
	SO_3	0,14
	CO_2	4,31
	Resíduo Insolúvel	14,76

Fonte: Autor (2016).

Através do Índice de Hidraulicidade verificou-se a possibilidade da utilização da escória ácida como material pozolânico. Conforme apresentado na TAB. 12, os valores para CaO , MgO , Al_2O_3 e SiO_2 , são respectivamente, 24,23, 5,03, 14,02 e 47,26%, fazendo a relação $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$, o resultado foi de 0,92, o que permitiu o estudo da escória ácida para adição na produção do cimento Portland pozolânico.

O teor de Resíduo Insolúvel mais o resultado elevado de SiO_2 , demonstra características de material pozolânico.

7.1.1 Índice de Atividade Pozolânica

Para o ensaio realizado através da NBR 5751:2012, a qual prescreve o método de ensaio para a determinação de atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, o resultado está apresentado na TAB. 13.

Tabela 13 – Índice de atividade pozolânica com hidróxido de cálcio

Identificação da amostra	Resultado (MPa)
	8,9
Escória Ácida	9
	9,1
Média	9

Fonte: Autor (2016).

A NBR 12653:2014 determina que a média dos resultados do rompimento dos três corpos-de-prova seja acima de 6 MPa, como evidenciado na TAB. 13 a média da resistência dos corpos-de-prova confeccionados com a escória ácida, foi de 9 MPa, ficando 3 MPa's acima do que exige a norma. Demonstrando a atividade pozolânica da escória em estudo.

7.1.2 Índice de atividade pozolânica com cimento

Foram rompidos os corpos-de-prova das duas argamassas distintas, afim de medir a resistência a compressão aos 28 dias de cura. Por meio dos resultados foi constatado o índice de atividade pozolânica com cimento da escória ácida (TAB. 14).

Tabela 14 – Índice de atividade pozolânica com cimento

Argamassa	Resistência a compressão (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica com cimento (%)
Argamassa A	43,1	93,0
Argamassa B	40,1	

Fonte: Autor (2016).

Segundo a NBR 5736:1999, para que o cimento constitua característica pozolânica, o seu índice de atividade pozolânica com cimento deve ser de no mínimo 75%, os resultados da TAB. 14 indicam que a escória ácida em estudo atendeu a exigência estabelecida pela norma. A escória ácida apresentou um índice de 93%, índice 18% acima do exigido pela norma.

7.2 Caracterização do Clinquer, Gesso e Material carbonático

Os resultados de Clinquer, gesso e do material carbonático são apresentados na TAB. 15.

Tabela 15 - Resultados de Clinquer, Gesso e Material carbonático

Resultados – Clinquer/Gesso/Material Carbonático																
Matérias-primas	Composição Química															
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaCO ₃	MS	MA	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{Livre}
Clinquer	20,36	5,05	64,83	2,86	1,8	3,14	0,11	1,02	*	2,57	1,76	61,85	11,7	8,54	8,7	1,68
Gesso	0,044	0,13	30,25	0,3	40,2	0,052	0	0,02	*	*	*	*	*	*	*	*
Material Carbonático	1,02	0,25	53,81	1,5	0,12	0,1	0	0,08	96,09	*	*	*	*	*	*	*

Fonte: Autor (2016).

Os resultados se mostraram satisfatórios, para todas as matérias-primas, o clinquer produzido pela empresa onde o estudo se realizou apresentou uma excelente qualidade. O material carbonático apresentou CaCO₃ de 96,09%, ficando 11,09% acima do que exige a NBR 5736:1999 (85%).

7.3 Desenvolvendo o cimento

A TAB. 16 apresenta o tempo de moagem de cada receita do cimento pozolânico e seu respectivo resultado de área específica, verifica-se que o tempo de moagem para as misturas dos materiais não pode ser menor que 120 minutos, para que se encontre uma área específica entre 4600 e 4700 g/cm², como proposto neste trabalho.

Tabela 16 – Tempo de moagem das receitas de cimento

Blaine x Tempo de Moagem					
	Cimento 1 30% Escória	Cimento 2 35% Escória	Cimento 3 40% Escória	Cimento 4 45% Escória	Cimento 5 50% Escória
Área específica (g/cm ²)	4689	4626	4670	4632	4683
Tempo de moagem (min.)	130	128	126	120	120

Fonte: Autor (2016).

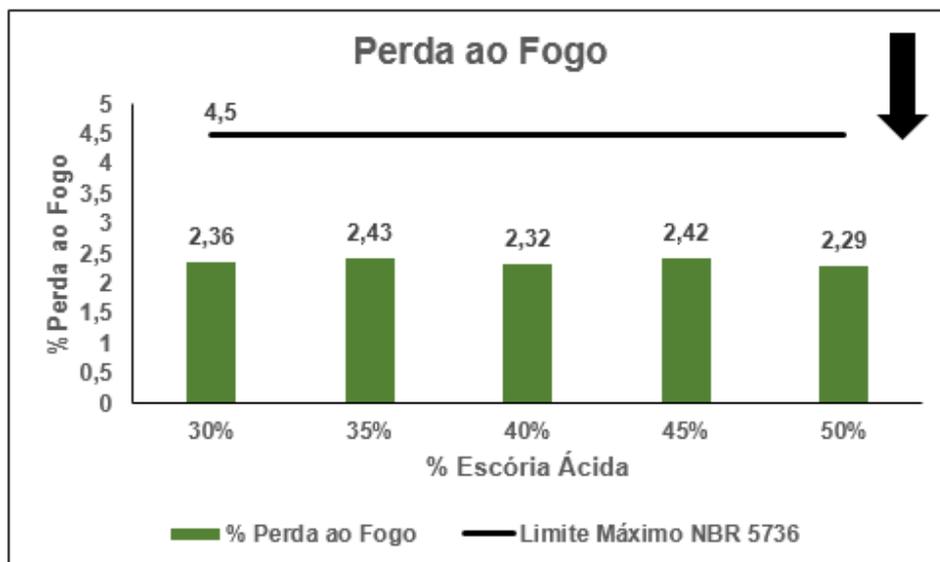
7.4 Resultados das análises químicas das amostras de cimento CP IV 32

Neste tópico foram apresentados os resultados através de gráficos e tabelas, junto a conclusões para cada exigência química exigida para o cimento Portland pozolânico CP IV 32.

7.4.1 Perda ao fogo

Os resultados de Perda ao fogo das amostras cimento estão apresentados no GRAF. 1 junto ao valor que a norma exige.

Gráfico 1 – Comparativo entre resultados de PF obtidos e a NBR 5736:1999



Fonte: Autor (2016).

Pelos resultados obtidos, verificou-se que devido ao valor fixado para a adição de material carbonático na produção do cimento, os resultados ficaram bem próximos. Verificou-se também que há margem para adicionar mais calcário, pois os

resultados ficaram em média 2% abaixo do limite máximo exigido pela norma. Tendo assim a oportunidade de adicionar mais calcário na produção, podendo reduzir seu custo de produção.

7.4.2 Óxido de Magnésio e outros componentes

A TAB. 17 descreve os resultados químicos das amostras de cimentos pozolânicos produzidos no laboratório, os resultados se mostraram coerentes, pois como verificado na TAB. 17, conforme alterava-se a adição de escória, o resultado de SiO_2 e Al_2O_3 se elevava.

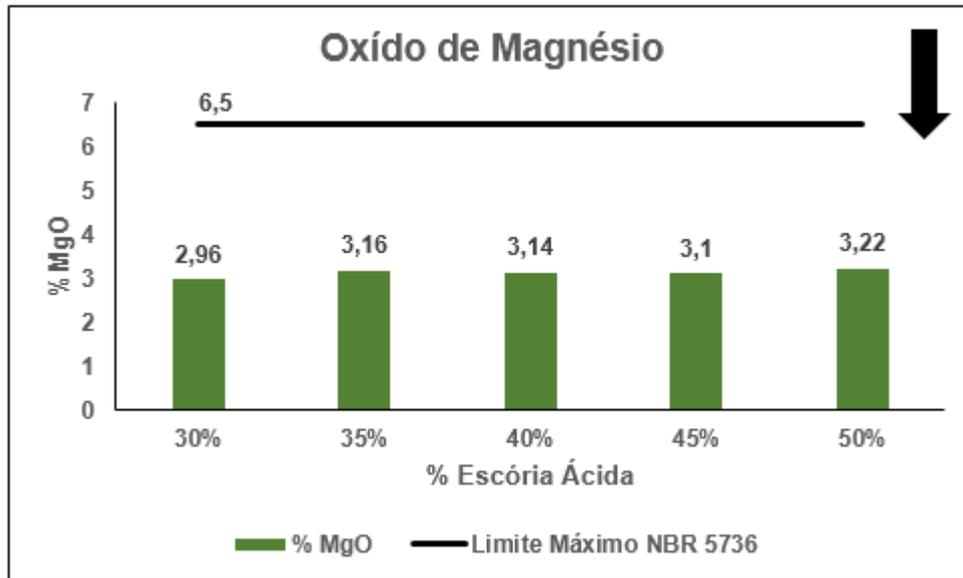
Tabela 17 - Resultados químicos das amostras dos cimentos produzidos

Resultados químicos dos cimentos produzidos					
	CIMENTO 1 30% ESCÓRIA	CIMENTO 2 35% ESCÓRIA	CIMENTO 3 40% ESCÓRIA	CIMENTO 4 45% ESCÓRIA	CIMENTO 5 50% ESCÓRIA
% SiO_2	27,5	29,98	32,87	33,4	34,12
% Al_2O_3	6,83	7,52	8,45	8,80	9,04
% CaO	52,92	50,19	45,31	44,23	42,25
% MgO	2,96	3,16	3,14	3,1	3,22
% Fe_2O_3	3,45	3,57	3,58	3,74	3,88
% Na_2O	0,17	0,23	0,12	0,11	0,18
% K_2O	0,84	0,79	0,66	0,77	0,97

Fonte: Autor (2016).

O GRAF. 2 apresenta os valores encontrados para óxido de magnésio o qual a NBR 5736:1999 exige que seja menor que 6,5%. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o maior valor encontrado foi de 3,22%, ficando 3,28% abaixo do que a norma exige.

Gráfico 2– Comparativo de resultados de MgO obtidos e a NBR 5736:1999



Fonte: Autor (2016).

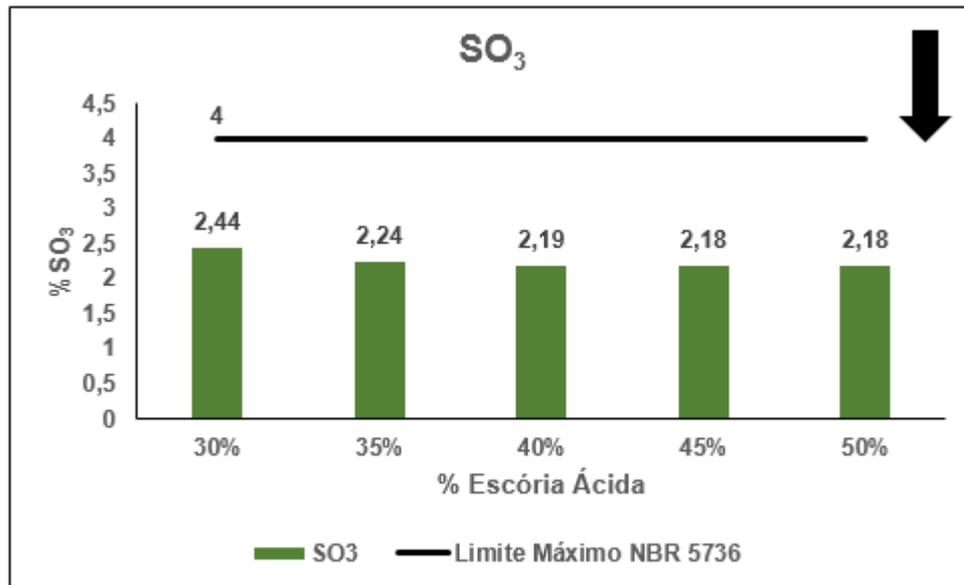
Como ilustrado anteriormente, a escória ácida dentre as matérias-primas utilizadas para a produção do cimento é a que possui o maior teor de óxido de magnésio, e como demonstrado no GRAF. 2, mesmo utilizando o máximo de adição deste material na produção do cimento CP IV 32, o óxido de magnésio ficou abaixo do que a NBR 5736:1999 exige.

7.4.3 Trióxido de enxofre (SO₃)

O GRÁF. 3 demonstra os resultados de trióxido de enxofre para as amostras de cimento, mostrando que está em média de 1,8% abaixo do limite máximo que é exigido na NBR 5736:1999.

Como a grande fonte de trióxido de enxofre no cimento vem da adição de gesso na produção do cimento, e ele influencia em outras características do cimento, como a resistência a compressão, para encontrar um valor ideal de trióxido de enxofre, seria ideal fazer outros experimentos, como o teste de Sulfatagem ótima, que consiste em coletar amostras de cimento com diferentes teores de trióxido de enxofre e correlacionar o ensaio de resistência a compressão dessas amostras propondo um valor para alcançar o maior valor de resistência do cimento.

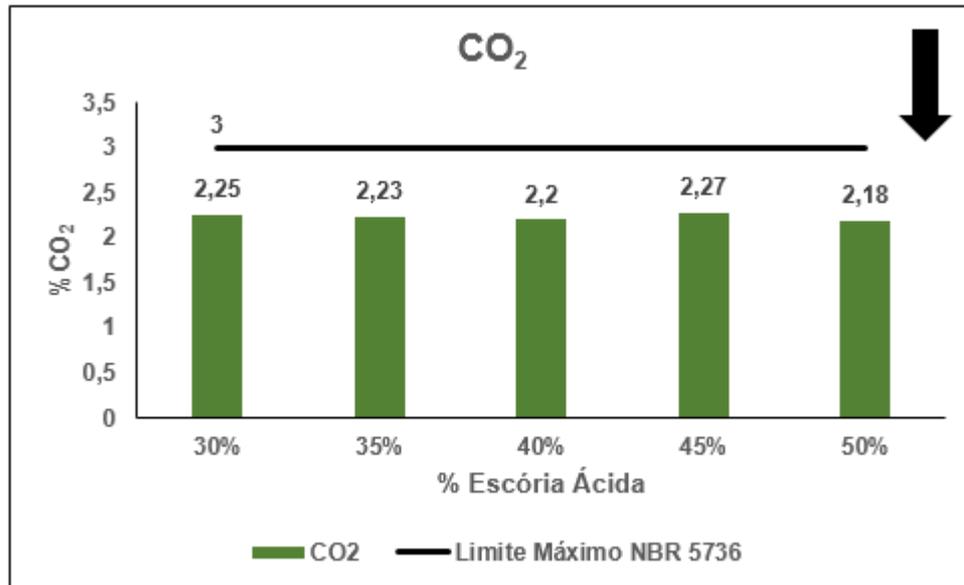
Gráfico 3 – Comparativo entre os resultados de SO₃ obtidos e a NBR 5736:1999



Fonte: Autor (2016).

7.4.4 Anidrido Carbônico (CO₂)

Como a fonte de Anidrido carbônico no cimento vem do material carbonático, a conclusão em relação aos seus valores é idêntica à dos resultados de Perda ao fogo, os resultados se mantiveram próximos uns dos outros devido a fixação da adição de material carbonático, tendo como o valor mais alto 2,44%, ficando 0,56% abaixo do valor máximo exigido em norma, o que permite aumentar a adição de material carbonático, podendo ajudar na redução do custo de produção deste cimento. Os valores encontrados nos ensaios são apresentados no (GRÁF. 4).

Gráfico 4– Comparativo de resultados de CO₂ obtidos e a NBR 5736:1999

Fonte: Autor (2016).

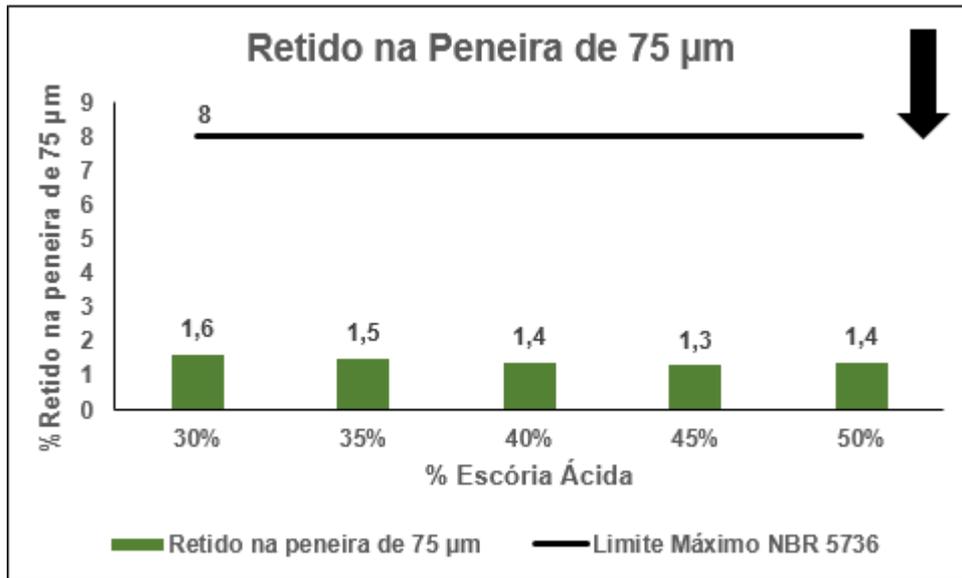
7.5 Resultados das análises físicas e mecânicas das amostras de cimento

Em seguida foram apresentados através de gráficos e tabelas, junto a conclusões os resultados das propriedades físicas e mecânicas das amostras de cimento Portland pozolânico CP IV 32 desenvolvidas no laboratório.

7.5.1 Determinação de Finura

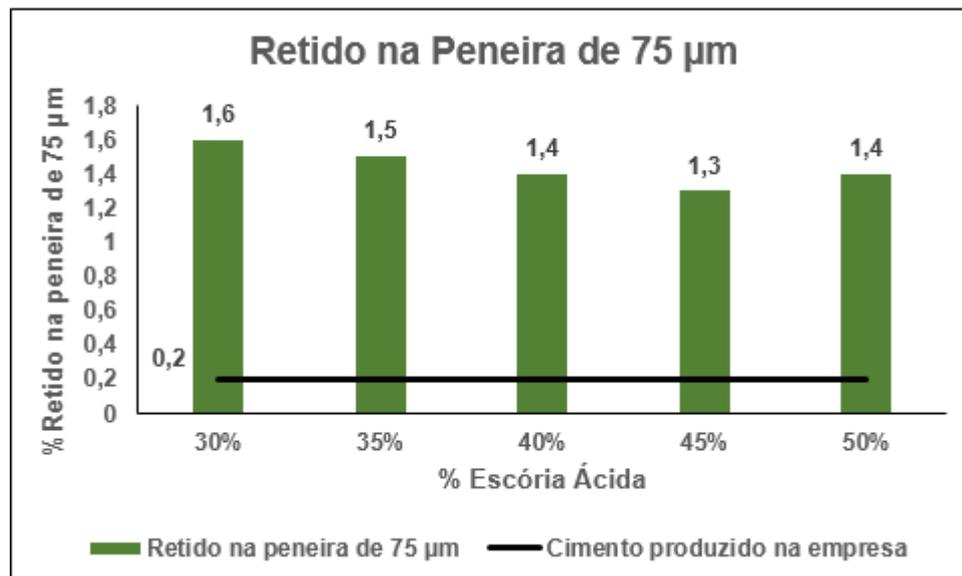
A NBR 5736:1999 faz exigência de finura somente para a peneira de 75 µm e seu limite é bem amplo, como apresentado no GRÁF. 5, os resultados de finura das amostras de cimentos produzidas ficaram bem distantes do máximo que exige a NBR 5736:1999. Mas ao comparar os resultados encontrados com a média de resultados do cimento produzido em escala industrial na empresa em que o estudo aconteceu, os resultados ficaram bem acima, como mostra o GRÁF. 6.

Gráfico 5 – Comparativo de resultados de finura obtidos e a NBR 5736:1999



Fonte: Autor (2016).

Gráfico 6– Comparativo de resultados de finura obtidos e o CP II E 32 produzido na empresa em estudo



Fonte: Autor (2016).

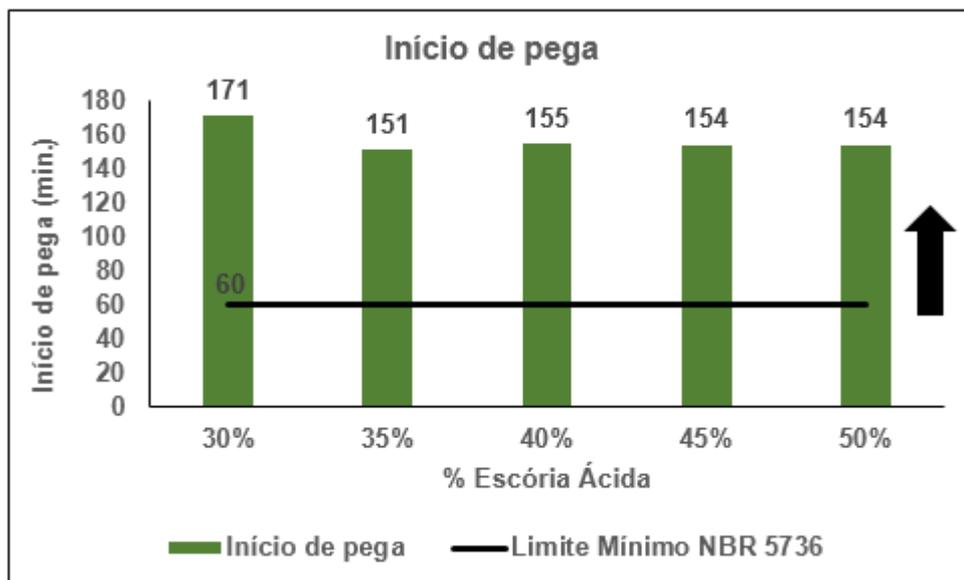
Esta diferença pode ser explicada pelo tipo de moagem, o moinho piloto de laboratório é composto por corpos moedores, em sua maioria de bolas, já o moinho industrial utilizado na empresa, é composto por rolos e tecnologia mais eficiente para controle da finura da produção de cimento.

7.5.2 Tempo de pega

Os resultados para Início de pega do cimento se mostraram satisfatórios, ficando em sua maioria na faixa de 150 minutos (2h e 30 minutos), ficando o dobro do mínimo do que exige a norma, GRÁF. 7. E para o Fim de pega, ao qual norma determina como ensaio facultativo e não como exigência, e que determina que seu valor tem que ser menor que 12 horas (720 minutos), os resultados ficaram na faixa de 200 minutos (3 horas e 20 minutos), como demonstra o GRÁF. 8.

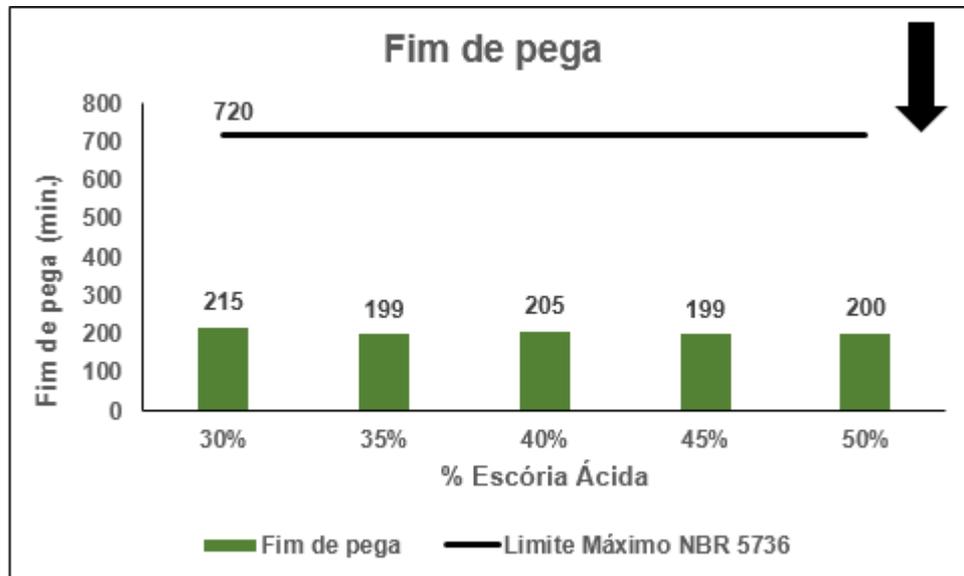
Para se chegar a um resultado ideal, a proposta seria verificar com que valores a maioria dos cimentos deste tipo (CP IV 32) no Brasil trabalham e para chegar a este seria alterado a quantidade de gesso utilizada na adição.

Gráfico 7– Comparativo de resultados de Início de Pega obtidos e a NBR 5736:1999



Fonte: Autor (2016).

Gráfico 8– Comparativo e resultados de Fim de pega obtidos e a NBR 5736:1999.



Fonte: Autor (2016).

7.5.3 Expansibilidade a quente

Os cimentos produzidos no laboratório não apresentaram expansibilidade, o que demonstra o bom controle de qualidade na produção do clínquer utilizado no trabalho, pois os dois principais causadores de expansibilidade do cimento são o óxido de magnésio e óxido de cálcio livre elevados no clínquer.

7.5.4 Resistência à compressão

As cinco amostras de cimentos compostas no laboratório atenderam as exigências para resistência a compressão da NBR 5736:1999, conforme demonstra a TAB. 18. A norma faz exigências para as idades 3, 7 e 28 dias, e para as respectivas idades os resultados ficaram bem acima das exigências, demonstrando que pode ser utilizada qualquer uma das cinco receitas propostas do trabalho.

Tabela 18 - Resultados de Resistências a compressão do cimento produzido no laboratório.

Resistência à compressão						
Resistência (Mpa)	Cimento 1 30% Escória	Cimento 2 35% Escória	Cimento 3 40% Escória	Cimento 4 45% Escória	Cimento 5 50% Escória	Limite mínimo da NBR 5736:1999
1 Dia	15,4	14,9	14,4	13,3	11,1	-
3 Dias	25,9	24,2	23,9	22,2	18,3	10
7 Dias	30,8	30,6	29,9	26,7	22,2	20
28 Dias	45,8	44,9	43,4	37,6	34,9	32

Fonte: Autor (2016).

Conforme aumentava a adição de escória ácida, a resistência à compressão decrescia, mas mesmo assim, utilizando o máximo de adição permitido o resultado foi satisfatório.

7.6 Comparação de custo entre a escória utilizada no trabalho com a escória utilizada na empresa

Comparando-se o custo de aquisição da escória ácida de alto forno com a escória de alto forno básica, a escória em estudo apresenta um custo de 3,73% maior.

A TAB. 19 apresenta a diferença percentual entre a simulação do custo das matérias-primas com o cimento CP II E 32 e o custo do cimento pozolânico CP IV 32 produzido no laboratório.

Tabela 19 - Diferença percentual entre o custo do CP II E 32 e CP IV 32.

Diferença de custo					
	Cimento 1 30% Escória	Cimento 2 35% Escória	Cimento 3 40% Escória	Cimento 4 45% Escória	Cimento 5 50% Escória
Diferença do custo	3,17% > X	0,18% > X	2,80% < X	5,80% < X	8,78% < X

Sendo X referente à simulação do CP II E 32.

Fonte: Autor (2016).

Apesar da escória ácida possuir um custo maior que a escória básica, a sua aquisição é compensada com a possibilidade de uma maior adição da mesma na produção do CP IV 32.

Como todos os resultados atenderam as exigências químicas, se levar em consideração somente o custo da matéria-prima em si, a utilização da escória ácida para a produção do CP IV 32 seria interessante. Em comparação com os cimentos produzidos no laboratório, as receitas com 40, 45 e 50% de adição de escória ácida tem uma redução no custo de 2,80, 5,80 e 8,78% respectivamente.

Para a produção industrial do cimento CP IV 32 outros dados deverão ser estudados para melhor avaliação do custo final deste cimento.

8 CONCLUSÃO

Neste teste laboratorial, o produto desempenhou excelente performance de qualidade, superando as exigências químicas, físicas e mecânicas da NBR 5736:1999: Perda ao fogo, Trióxido de enxofre, Anidrido carbônico, Óxido de magnésio, Tempo de pega, Expansibilidade a quente, Finura na peneira de 75 µm, Resistência a compressão

O estudo se mostrou satisfatório também em relação ao custo da escória ácida, as amostras com adição de 30 e 35% tem um custo de 3,17 e 0,18% respectivamente a mais em comparação com o CP II E 32 produzido pela empresa. Já as amostras com adição de 40, 45 e 50%, possuem um custo de 2,80, 5,80 e 8,78% respectivamente abaixo do custo do CP II E 32, considerando somente o custo das matérias-primas.

Conclui-se que a partir de 40% de adição de escória ácida na produção do CP IV 32, o custo do CP IV 32 será mais baixo que o CP II E 32, como adição de material pozolânico para o cimento CP IV 32 pode se dar até em 50%, tem – se a oportunidade de adicionar mais 14% de escória ácida na produção do CP IV 32, o que faz o seu custo ser mais baixo do que o CP II E 32. Para ter o custo total, o produto deverá ser feito em escala industrial para verificação dos demais custos, pois a produção do CP IV 32 pode exigir menos, igualmente ou mais “esforço” por parte dos equipamentos.

Foi o primeiro teste de produção de cimento em laboratório realizado na unidade da empresa onde o estudo aconteceu, servindo como base para outros que viram.

Como sugestão, o teste deveria ser realizado também em escala industrial e amostras provenientes deste teste, enviadas aos laboratórios da ABCP, para que a mesma avalie com mais análises químicas, físicas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

- ASSIS. A. N. **Modelo Matemático para otimização de dosagem de matérias-primas na produção de cimento**. 2005. 43 p. Graduação (Trabalho de graduação em Ciências da computação) – Presidente Antônio Carlos - UNIPAC, MG. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 9. ed. São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de ensaios físicos de cimento**. 3. ed. São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. [S.l.:S.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php/>>. Acesso em: 23 de abril 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, RJ, 2012. 4p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, RJ, 2016. 4p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, RJ, 1999. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento aos 28 dias. Rio de Janeiro, RJ, 2014. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, RJ, 1996. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2014. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, RJ, 2009. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 20**: Cimento Portland e suas matérias-primas - Análise química – Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação de pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland. Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, RJ, 1998. 12p.

BATTAGIN, Arnaldo Forti (2006). **Uma breve história do cimento** Portland. Disponível em: < www.cimento.org.br >. Acesso 23 de abril de 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2011. v. 1.

CAMÕES, A. **Betões de elevado desempenho com volume de cinzas volantes**. Revista de Engenharia Cívica. Azurém, Portugal, n.23, p.55-64. 2005.

CENTRO DE EDUCAÇÃO FEDERAL DO PARANÁ. **Apostila de Tecnologia do Concreto**. Paraná, 2004. 102 p. (Apostila).

CIMENTO.ORG, **Cimento no Brasil**. Brasília, DF. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: 25 de maio de 2016.

CIMENTO.ORG (2010), **CP IV Cimento Portland Pozolânico**. Brasília, DF. Disponível em: <<http://cimento.org/cp-iv-32-cimento-portland-pozolanico/>>. Acesso em: 25 de maio de 2016.

Coimbra, M. A., Libardi, W. Morelli, M. R. **Estudo da influência de cimentos na fluência em concretos para a construção civil**. Cerâmica, São Paulo, v.52, n.321, p.98-104, Mar 2006.

DE PÁDUA, P. Gol. **Desempenho de compostos cimentou-os fabricados por cinza de bagaço de cana de açúcar in natura e beneficiadas**. 2012. 209 p. Trabalho de Pós-Graduação (Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2012.

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 em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Itajubá, Itajubá-MG, 2009.

FOREINGN LAND LTDA. **Curso de Microscopia de Clinquer de Cimento Portland**. Curitiba, PR, 2006. 52 p. (Apostila).

GALHARDO, P. G. **Estudo da produção de cimento com ênfase no Classe G**. 2014. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

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

GIUNTINI, Aldo de Magalhães. **Caracterização e análise macro e macroestrutural de concretos fabricados com cimento contendo escórias de alto-forno**. 2007. 268 p. Trabalho de Pós-Graduação (Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG. 2007.

IBRACON. **Materiais de construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. rev. São Paulo: 2007. v. 1.

INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Materiais componentes do concreto – Especificações e ensaio**. Rio Grande, RS, 2014. 57 p. (Apostila).

IBGE, **Informações completas**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/CUR>>. Acesso em: 25 de junho 2016.

ITAMBÉ, **Início e Fim de pega. Qual a utilidade?** Paraná, Balsa Nova, PR. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/inicio-e-fim-de-pega-qual-a-utilidade/>>. Acesso em: 30 de maio de 2016.

JONH, M. VANDERLEY. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199 p. Trabalho de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de São Paulo – PCC USP, São Paulo, SP. 1995.

KHIARA, Y.; VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. [S.l.:s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>> Acesso em: 22 de abril 2016.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D**. Sitientibus, Feira de Santana, n. 26, p. 111-130, jan/jun. 2002.

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

MASSAZZA, F. **Pozzolanic Cements**. Cement e Concrete Composites, v.15, p.185-214, 1993.

MARINGOLO, V. **Clinker co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria cimenteira**. 2001. 174 p. Tese de doutorado (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MASSUCATO, J. C. **Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto**. 2005. 122 p. Tese (Mestrado na Área de concentrações de edificações) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

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

NELSON, E.; GUILLOT, D. (Ed.). **Well cementing**. 2. Ed. Sugar Lands: Schlumberger, 2006

NEVILLE, A.M, **Properties of Concrete**, 4th Ed., Pearson Limited England, 2002.

Panzer, T. H. et al. **Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento Portland e resina epoxi**. Cerâmica, São Paulo, v.56, n.337, p.77-82. Mar. 2010.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 14 ed., 2005, 307p.

POLARI D. **A Influência das diferentes formas de sulfato de cálcio em argamassas de cimento Portland com uso de superplastificantes**. 2007. 198 p. Trabalho de Pós-Graduação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.

RATTI, Giuliana. **VII Curso de FRX Panalytical**. São Paulo, 2013. 54p. (Apostila).

SACHS, J.; WARNER, A. M. **Natural resource abundance and economic growth**. NBER Working Paper, n. 5398, 1995.

SILVA, L. S. M. **Montagem de posicionador de varredura bidimensional automatizada acoplado a espectrometria de fluorescência de raios X**. 2011. 87 p.. Tese de Mestrado (Mestrado em Ciências e Técnicas nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG. 2011.

SNIC, **Resultados Preliminares**. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Abril%202016.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2016.

SOARES, A.K. (Coordenador do projeto). **Caracterização de escória siderúrgicas com propriedades aglomerantes**. São Paulo: ABCP, 1982. 211p.

WEIL, K. E. **Logística: suprimentos, armazenagem, distribuição**. Revista administração de empresas, São Paulo, v.30, n.1, p.80-81. Mar. 1990.