

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA VOLANTE COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO**

Andressa Bianca da Costa

Lajeado, Junho de 2015

Andressa Bianca da Costa

**POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA VOLANTE COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, Junho de 2015

Andressa Bianca da Costa

**POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA VOLANTE COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO**

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: _____

Prof. Me. Rafael Mascolo, UNIVATES.

Mestre em Engenharia Civil pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Ivandro Carlos Rosa, UNIVATES

Mestre pelo Centro Universitário Univates, Lajeado, Brasil.

Prof. Marcelo Freitas Ferreira, UNIVATES.

Mestre pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil: _____

Prof. Doutora. Emanuele Amanda Gauer

Lajeado, 15 de junho de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz e Mirian, que são a base do meu ser e por muito colaboraram para que eu concluísse esta etapa, meu amor por vocês é eterno, obrigada pela educação, carinho e amor.

A minha irmã Aline e ao meu irmão Alexandre, por acreditarem no meu potencial e me apoiarem em todos os momentos.

E ao meu namorado Gustavo, pelo apoio nos momentos difíceis, incentivo e por me ajudar a tornar este sonho possível.

Sem vocês todo o esforço não teria sentido!

AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa só foi possível graças à colaboração de algumas pessoas, as quais expresso profundo agradecimento.

Agradeço ao meu Orientador, Prof. Me. Rafael Mascolo, pela dedicada atenção, incentivo, aprendizado proporcionado e por tornar possível boa parte dos ensaios realizados neste trabalho.

Ao Prof. Márcio Goerck, pela sugestão de tema de pesquisa.

A pessoa do Sr. Marco, da empresa Pré-Concretos Engenharia, por me receber na empresa e fornecer a cinza volante utilizada na execução dos ensaios deste trabalho.

A pessoa do Eng. Fernando, pela doação do cimento utilizado.

Ao colega de curso Rodrigo, do Laboratório de Tecnologias da Construção - LATEC, por me auxiliar na realização dos ensaios.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS, por terem realizado os ensaios.

E a todos os amigos, colegas e familiares, que colaboraram para a conclusão deste trabalho, me dando força e incentivo.

“O futuro não é um lugar onde estamos indo,
mas um lugar que estamos criando.
O caminho para ele não é encontrado,
mas construído
e o ato de fazê-lo
muda tanto o realizador quando o destino.”

Antonie de Saint-Exupéry

RESUMO

O aumento de consumo do cimento desencadeou uma série de problemas ambientais relacionados à sua fabricação. A partir da necessidade de preservação ambiental, estudos foram iniciados e serviram como base para a busca por alternativas que diminuam o esgotamento dos recursos naturais e o aumento das emissões dos gases do efeito estufa, gerados durante o processo produtivo do cimento. Através da procura por materiais alternativos, que sirvam de incorporação ou como adições minerais em matrizes cimentícias, foram iniciadas pesquisas sobre o emprego de subprodutos industriais. O emprego da cinza volante, resíduo da queima de carvão em termelétricas, tem sido estudado por pesquisadores que atestam a sua utilização como material pozolânico na substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas. Estudos anteriores mostram que a cinza volante possui características pozolânicas vantajosas, quando adicionada como substituição parcial do cimento, garantindo aumento de resistência à compressão simples, durabilidade em ambientes ácidos e impermeabilidade, além de vantagens econômicas e ambientais. Portanto o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial pozolânico da cinza volante, proveniente da Termelétrica de Candiota/RS, como material de substituição parcial do cimento Portland. Realizou-se caracterização física e mineralógica da cinza volante, bem como avaliação da resistência à compressão simples de argamassa constituída por 25 % de substituição em percentual de massa de cimento por cinza volante, para análise do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Através dos resultados dos ensaios de resistência da argamassa verificou-se que a cinza volante não atende os parâmetros físicos e potencial mínimo estabelecido pela NBR-12653 (ABNT, 2014). Embora estes parâmetros não tenham sido atingidos, seu ganho de resistência com 63 dias teve um aumento considerável, o que a torna viável em outros usos.

Palavras-chave: Pozolana. Cinza Volante. Cimento.

ABSTRACT

The increase in the consumption of cement triggered a series of environmental problems related to its manufacturing. From the need for environmental preservation, studies have been initiated and served as the basis for the search for alternatives that reduce the depletion of natural resources and the increase of greenhouse gases generated during the process of the production of cement. Through the search for alternative materials, which can serve as a merger or as mineral additions in cement matrices, research on the use of industrial by-products began. The use of fly ash, residue from the burning of coal in power plants, has been studied by researchers who attest its use as pozzolanic material in the partial replacement of Portland cement in concrete and mortar. Previous studies show that the pozzolanic fly ash has advantageous characteristics when added as a partial replacement of cement, ensuring increased resistance to simple compression, durability in acid environments and waterproofness, in addition to economic and environmental advantages. Therefore, this study aims to evaluate the potential of pozzolanic fly ash from the Termelétrica Candiota / RS, as partial replacement material of Portland cement. Through physical and mineralogical characterization of fly ash, and resistance to compressive mortar, consisting of 25 % replacement of cement mass percentage of fly ash, to analyze the pozzolanic activity index with Portland cement at 28 days. By performing the mortar strength tests it was found that fly ash has not reached the physical parameters and minimum potential established by the NBR-12653 (ABNT, 2014). But while these parameters were not met, your strength gain with 63 days has increased considerably, making it feasible for other uses.

Keywords: Pozzolan . Fly Ash . Cement .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fabricação do cimento.....	28
Figura 2 – Representação das pastas de cimento (i) sem adição e (ii) com adição pozolânica.	38
Figura 3 – Localização das termelétricas	41
Figura 4 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante	44
Figura 5 – Peneiramento e separação como; areia grossa, média grossa, média fina e fina. ...	49
Figura 6 - Cinza Volante disponibilizada na sede da empresa.	50
Figura 7 - Equipamento: Analisador granulométrico - CILAS 1180 LD	52
Figura 8: Frasco volumétrico de Le Chatelier, ensaios “i” e “ii”.	53
Figura 9 - i) golpes na segunda camada ii) retirada do excesso de argamassa.....	55
Figura 10 – Abatimento de tronco das argamassas “A” e “B”(iii).	56
Figura 11 – execução dos golpes na ultima camada (iv) e finalização do preenchimento (v). 57	
Figura 12 - Difratoograma com os picos e halo amorfo.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cimentos Portland normalizados no Brasil.....	23
Tabela 2 – Compostos fundamentais do cimento Portland.....	25
Tabela 3 – Composição dos cimentos Portland.....	25
Tabela 4 – Aplicação dos cimentos Portland	27
Tabela 5 – Quantidade anual de subprodutos gerados no mundo	31
Tabela 6 – Exigências físicas	34
Tabela 7 – Exigências químicas	35
Tabela 8 - Determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos.	35
Tabela 9 – Exigências químicas, físicas e mecânicas: NBR-11578 (ABNT,1991).....	48
Tabela 10 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CII-F-32.	48
Tabela 11 - Quantidade de material em massa.....	55
Tabela 12 - Compostos presentes na amostra.....	60
Tabela 13 – Dados granulométricos	61
Tabela 14 - Comparação entre as propriedades granulométricas.	62
Tabela 15 - Superfície específica da cinza volante.....	63
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas A e B.	64
Tabela 17 - Comparação entre o índice mínimo e o índice obtido nos ensaios.	65
Tabela 18 - Índice de desempenho com cimento para cada idade.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Produção do cimento no período dos anos de 1970 a 2012	30
Gráfico 2 - Gráficos de resistência à compressão.....	39
Gráfico 3 - Gráfico de comparação das dimensões de partículas	45
Gráfico 4 - Distribuição Granulométrica.	61
Gráfico 5 - Efeito do ganho de resistência.	66
Gráfico 6 - Curva de crescimento da resistência das argamassas A e B.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP:	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL:	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASTM:	American Society for Testing and Materials
BET:	Brunauer, Emmett, Tellerals
CORSAN:	Companhia Riograndense de Saneamento
CP:	Cimento Portland
CPB:	Cimento Portland Branco
CPP:	Cimento para Poços Petrolíferos
DRX:	Difração de Raios X
IBC:	Indústria Brasileira de Cimento
LACER:	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LATEC:	Laboratório de Tecnologias de Construção
NBR:	Norma Brasileira Regulamentadora
NM:	Norma Mercosul
NORIE:	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
SNIC:	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFRGS:	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTPM:	Usina Termelétrica Presidente Médice

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo do trabalho	16
1.2	Objetivo principal.....	17
1.3	Objetivos secundários.....	17
1.4	Justificativa.....	17
1.5	Delimitação	19
1.6	Organização do trabalho.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Cimento.....	21
2.1.1	Cimento Portland	22
2.1.2	Normalização do cimento Portland	23
2.1.3	Composição.....	24
2.1.4	Utilização	26
2.1.5	Processo produtivo	27
2.1.6	Impactos ambientais gerados durante o processo produtivo.....	30
2.2	Adições Minerais	32
2.2.1	Pozolana.....	33
2.2.2	Classificação dos Materiais Pozolânicos.....	34
2.2.3	Atividade Pozolânica	36
2.2.4	Vantagens da utilização de materiais pozolânicos.....	39
2.3	Material de Subproduto: Cinza Volante	40

2.3.1	Cinzas.....	42
2.3.2	Cinza Volante	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	46
3.1	Materiais.....	47
3.1.1	Cimento Portland	47
3.1.2	Agregado miúdo	48
3.1.3	Cinza Volante	49
3.1.4	Água	50
3.2	Metodologia	50
3.2.1	Análise mineralógica	51
3.2.2	Análise granulométrica	51
3.2.4	Superfície específica	54
3.2.5	Avaliação da pozolanicidade.....	54
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	59
4.1	Análise Mineralógica.....	59
4.2	Análise Granulométrica	60
4.3	Análise da massa específica.....	62
4.4	Superfície específica	63
4.5	Avaliação da Pozolanicidade.....	63
5	CONCLUSÃO.....	68

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland o qual durante a operação é incorporado sulfato de cálcio NBR-5732, (ABNT, 1991). Sua constituição se baseia em clínquer e adições. O clínquer esta presente em todos os tipos de cimento Portland, e as adições variam de acordo com o tipo de cimento (ABCP, 2002). O processo produtivo baseia-se em uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais transformadas em clínquer (IBC, 2012). O aumento da produção de cimento vem sendo significativa nos últimos anos, no Brasil no ano de 2012 o consumo de cimento bateu recorde, impulsionando a produção que atingiu 69,3 milhões de toneladas (SNIC, 2013).

O processo produtivo de cimento gera impactos ambientais que devem ser minimizados, entre os quais estão esgotamento da matéria prima, poluição de rios e emissão dos gases do efeito estufa. Estudos internacionais atribuem 5% das emissões atmosféricas de CO₂ a fabricação de cimento, e este percentual tem previsão de crescimento visto que a tendência é que o consumo de cimento aumente (SNIC, 2013). Por isso se faz necessário agregar conhecimento em busca de um material que substitua o cimento, ainda que parcialmente, em argamassas e concretos.

Pesquisas estão sendo feitas mundialmente, utilizando adições minerais como uma opção para a redução do impacto ambiental gerado durante o processo produtivo do cimento. As adições minerais são materiais que apresentam reação pozolânica ou cimentante, que podem ser incorporados como substituição parcial do cimento em argamassas e concretos, de modo a reduzir o consumo de cimento em proporções que variam de 20 a 70 % (MEHTA E

MONTEIRO, 2008). Estudos comprovaram que a utilização de adições minerais de pozolana atribui a materiais cimentícios aumento da durabilidade em ambientes ácidos, da resistência à compressão, e da impermeabilidade, além de vantagens ambientais e econômicas.

Em muitos países a utilização de subprodutos como substituição parcial do cimento ou como adição mineral já é uma prática difundida, atingindo muitas vezes, na produção de cimento, maior porcentagem do que a produção de cimentos constituídos exclusivamente por clínquer (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Os primeiros registros da prática de utilização de pozolana no Brasil foram realizados durante a construção de barragens, quando as cinzas volantes provenientes das termelétricas de Charqueadas/RS e Candiota/RS foram utilizadas. (PRISZKULNIK, 1981).

Durante o processo de queima de carvão mineral nas termelétricas são gerados dois tipos de cinzas, a cinza volante e a cinza pesada. A cinza volante é a cinza coletada nos precipitadores eletrostáticos, e a cinza pesada é a que fica armazenada no fundo das fornalhas (KIHARA, 1986). A cinza volante possui emprego em matrizes cimentícias, contribuindo para o aumento da resistência à compressão simples, incremento do volume na pasta de mistura e atividade pozolânica (CANON, 1968).

Para fins de validação, sobre as vantagens da utilização da cinza volante como material de substituição parcial do cimento, especificamente neste trabalho foram realizados ensaios mineralógicos e físicos de caracterização da cinza volante, e ensaio de compressão simples em argamassa, para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com o proposto pela NBR-5752 (ABNT, 2014).

1.1 Objetivo do trabalho

Os objetivos do trabalho estão divididos em principal e secundários.

1.2 Objetivo principal

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar o potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial do cimento Portland.

1.3 Objetivos secundários

Os objetivos secundários abrangem os assuntos relevantes para o desenvolvimento do objetivo principal do trabalho. Destacando-se a execução de ensaios físicos e mineralógico da cinza volante, que foram executados a fim de complementar o resultado final obtido nesta pesquisa.

1.4 Justificativa

O crescimento do consumo de cimento vem gerando o aumento de produção deste produto, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2013) durante os últimos 40 anos houve um aumento de 60 milhões de toneladas na produção de cimento, o que gerou problemas ambientais relacionados a extração de matéria prima e emissão de gases do efeito estufa. Devido a este fato foram iniciadas pesquisas em busca de alternativas que reduzam os impactos gerados durante o processo produtivo do cimento, ou materiais alternativos que em parte substituam o cimento. Segundo Mehta e Monteiro (2008), sempre que um material com menos processamento for utilizado como substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas, haverá uma considerável economia de energia e de custo. O mesmo autor cita que a necessidade da procura por um material ambientalmente correto, que não elevasse o valor econômico do cimento e seus derivados, estimulou o investimento em pesquisas científicas que abordassem a utilização de matérias primas

alternativas, assim como os subprodutos industriais, como material de incorporação em cimentos Portland ou como material de adição em argamassas e concretos.

Os subprodutos industriais representam uma ampla parcela dos resíduos gerados em grande escala no mundo, tendo como principais fontes geradoras, usinas de energia elétrica e alto-fornos metalúrgicos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Através do conhecimento desta problemática se faz necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e pesquisas científicas que permitam incorporar subprodutos ao sistema produtivo de cimento (HOPPE FILHO, 2008), pois as más disposições destes materiais além de gerar impactos ambientais consistiriam em um desperdício econômico, considerando o valor que pode ser atribuído a estes subprodutos.

De acordo com Mallmann (1996), no estado do Rio Grande do Sul localizam-se três das cinco usinas termelétricas¹ localizadas no sul do Brasil, o que garantiria grande volume de cinza volante gerada, o que torna viável a utilização deste resíduo, uma vez que elevada quantia seria necessária para utilização como material de composição do cimento ou como adição mineral em argamassas e concretos fabricados no Rio Grande do Sul e demais estados da região sul do país. No Rio Grande do Sul são gerados aproximadamente 1.600.000 toneladas/ano de resíduos oriundos de termelétricas, essa quantidade inclui as cinzas, volante e pesada (MALLMANN, 1996). O mesmo autor cita que somente cerca de 25 a 30 % da cinza gerada é consumida para a fabricação de cimento Portland, e o restante é disposto no meio ambiente, em muitos casos, de forma inadequada.

A cinza volante gerada durante a combustão de carvão mineral nas termelétricas corresponde a aproximadamente 80 % dos resíduos gerados (KIHARA, 1986). Segundo Hoppe Filho (2008), a grande disponibilidade da cinza volante evidencia a necessidade de agregar conhecimento sobre este subproduto, de forma a viabilizar a utilização, como por exemplo, em um maior teor na composição do cimento Portland pozolânico.

¹ Usinas termelétricas localizadas na região sul do Brasil utilizam carvão mineral como combustível o que ocasiona a geração de resíduos, produzindo milhões de toneladas de cinzas volantes e pesadas todos os anos.

De acordo com Brown (2011), as características da cinza volante variam de acordo com as propriedades² do carvão utilizado para a queima, o que significa que as amostras podem conter composição diversificada variando de acordo com a localização da mina de extração, carvão utilizado e o processo de queima. Portanto, são necessárias pesquisas que possibilitem maior conhecimento da cinza volante através de suas características físicas, mineralógicas, atividade pozolânica e influencia gerada na microestrutura das matrizes cimentícias, o que justifica a pesquisa realizada no presente trabalho.

1.5 Delimitação

Neste trabalho foi analisada uma amostra de cinza volante, gerada no primeiro semestre do ano de 2014, durante o processo de combustão de carvão mineral, da Usina Termelétrica Presidente Médici - UTPM - Candiota II, localizada na cidade de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul.

1.6 Organização do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, conforme o descrito abaixo:

No capítulo 1 são apresentadas, a introdução, as considerações gerais, os objetivos principal e secundários, a relevância, as delimitações do tema e organização do trabalho. De forma que facilite a compreensão do conteúdo principal do trabalho. O capítulo 2 compõe a revisão bibliográfica, abrangendo: cimento Portland e pozolanas, com ênfase no estudo sobre o potencial pozolânico da cinza volante. Durante a abordagem dos assuntos deste capítulo são apresentadas informações gerais de classificação, composição, utilização e questão ambiental relacionada ao objetivo principal do trabalho. No capítulo 3 são expostos os materiais e a metodologia utilizada para os ensaios laboratoriais de caracterização e avaliação de índice de

² As diferenças nas propriedades da combustão de macerais individuais irão determinar os tipos de resíduos de carbono encontrados nas cinzas pesadas e leves. Macerais são componentes microscópicos orgânicos do carvão e são compostos pelos restos de plantas terrestres superiores e restos de algas e esporinítas.

atividade pozolânica da cinza volante. No capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises obtidas durante a execução dos ensaios. E por fim, no capítulo 5, são expostas as conclusões finais sobre a pesquisa realizada neste específico trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento

Segundo Battagin, (2009), a palavra cimento provém da palavra *Caementu* que em latim significa pedra natural de rochedos, não esquadrejada utilizada na Roma antiga, datado ha cerca de 4.500 anos. No Egito antigo já era utilizado, uma mistura de gesso calcinado rígida e resistente, em seus imponentes monumentos. Grandes obras como Panteão e o Coliseu, de origem grega e romana, utilizaram em sua construção solos de origem vulcânica, provenientes da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento quando adicionada água.

O mesmo autor ainda destaca que um marco importante na história do cimento ocorreu no ano de 1756 quando o inglês John Smeaton, através da calcinação de calcários moles e argilosos obteve um produto de alta resistência, que posteriormente foi patenteada por Joseph Aspadin.

2.1.1 Cimento Portland

Joseph Aspdin em 1824 patenteou como cimento Portland, a mistura em meio úmido de calcário moído com argila, onde a água era evaporada através de exposição à luz solar, e os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e moídos bem finos. Segundo Taylor³ (1992) *apud* Silva (2006), o nome foi referenciado a Portlandstone, pois sua cor, alta resistência e durabilidade se assemelharam a esse tipo de rocha, existente na ilha Britânica de Portland.

Isaac Johnson, no ano de 1845, queimou uma mistura composta de argila e greda (*giz*), ocasionando uma reação química necessária para a formação de compostos de alta resistência, formando o clínquer. Ficando conhecido como o protótipo do cimento moderno (NEVILLE, 1997).

No Brasil, segundo Battagin (2009), no ano de 1924 houve na cidade de Perus, estado de São Paulo a instalação da Companhia Brasileira de Cimento Portland, que colocou no mercado, no ano de 1926, as primeiras produções de cimento brasileiro, que foram gradativamente aumentadas através da implantação de novas fábricas, o que culminou para o fim da importação de cimento no país nas décadas seguintes.

Existiu no Brasil uma evolução sobre os conhecimentos técnicos de cimento Portland e atualmente a fabricação do cimento Portland obedece a critérios estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras. E sua conformidade de fabricação é avaliada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002).

O cimento Portland é definido pela NBR-5732 (ABNT, 1991), como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland o qual durante a operação é incorporado sulfato de cálcio.

³ TAYLOR, H.F.W. *Cement Chemistry*. 2ª ed. Londres: Ed. Academic Press, 1992.

2.1.2 Normalização do cimento Portland

Os tipos de cimento Portland são definidos pela sua composição e resistência, nomeados pelo prefixo CP, acrescido dos algarismos Romanos I, II, III, IV e V, e com classes definidas pelos números 28, 32 e 40 estipulados de acordo com a resistência a compressão definidas pelos fabricantes ao atingir a idade de cura de 28 dias (ABCP, 2002).

A Tabela 1 apresenta os cinco tipos básicos de cimento Portland fabricados no Brasil, de acordo com seu nome técnico, sigla, classe e norma regulamentadora.

Tabela 1 – Cimentos Portland normalizados no Brasil

	Nome Técnico	Sigla	Classe	NBR
Cimento Portland Comum	Cimento Portland Comum	CPI	25, 32, 40	5732-1991
	Cimento Portland Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	
Cimento Portland Composto	Cimento Portland Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	11578-1991
	Cimento Portland Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	
	Cimento Portland Composto com Filer	CPII-F	25, 32, 40	
Cimento Portland de Alto-Forno		CPIII	25, 32, 40	5735-1991
Cimento Portland Pozolânico		CPIV	25, 32	5736-1991
Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial		CPV-ARI	-	5733-1991

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além dos tipos básicos de cimento especificados na Tabela 1, segundo a ABCP (2002) existe cimentos derivados dos tipos básicos, com específicas características ou peculiaridades, chamados cimentos especiais e cimentos para uso específico:

a) Cimentos Especiais:

- Cimento Portland resistente aos sulfatos: com sigla e classe acrescida do sufixo RS, regulamentado pela NBR-5737 (ABNT, 1992).
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação: com sigla e classe acrescida do sufixo CP, regulamentado pela NBR-13116 (ABNT, 1994).

b) Cimento com determinada característica:

- Cimento Portland branco: estrutural e não estrutural, com sigla CBP, classe 25,32 e 40, regulamentado pela NBR-12989 (ABNT, 1993).
- c) Cimento para uso específico:
 - Cimento para poços petrolíferos: com sigla CPP, classe G, regulamentado pela NBR-9831 (ABNT, 2006).

2.1.3 Composição

O cimento Portland é constituído de clínquer e adições. O clínquer está presente em todos os tipos de cimento Portland, e é o seu principal constituinte, as adições variam de acordo com o tipo de cimento, definindo e diferenciando os tipos fabricados (ABCP, 2002).

O clínquer é obtido através do cozimento até a fusão incipiente da mistura de calcário com argila que é dosada e homogeneizada de forma que a cal se combine com os compostos argilosos. Após o cozimento é incorporada uma quantidade reduzida de sulfato de cálcio, para que o teor de anidrido sulfúrico (SO_3) não ultrapasse o limite de regularização do tempo de início das reações do aglomerante com a água (PETRUCCI, 1998).

As adições são diferentes matérias primas, que adicionadas ao clínquer no processo de moagem permitem uma variedade de tipos de cimento Portland, as quais modificam suas propriedades e facilitam seu emprego. Estas matérias primas compreendem gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos (ABCP, 2002).

O cimento Portland possui como constituintes fundamentais, cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), magnésia (MgO), água (H_2O) e o anidrido sulfúrico (SO_3). E constituintes menores, impurezas como, óxido de sódio, potássio, titânio, e substâncias de menor importância (BAUER, 2008).

Bauer (2008) cita que estes constituintes são misturados, em proporções convenientes, finamente pulverizados e homogeneizados e após são expostos à ação do calor até a temperatura de fusão incipiente que possibilita a obtenção do clínquer. Este processo conduz a formação dos compostos, descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Compostos fundamentais do cimento Portland

Nome do Composto	Abreviações	Composição
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO . SiO ₂
Silicato bicálcico	C ₂ S	2CaO . SiO ₂
Aluminato tricálcico	C ₃ A	3CaO . Al ₂ O ₃
Ferro Aluminato tetracálcico	C ₄ AF	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃

Fonte: Bauer (2008).

Na Tabela 3 é descrita a composição dos cinco tipos básicos de cimento Portland fabricados no Brasil, de acordo com sua sigla, e composição por percentual de massa.

Tabela 3 – Composição dos cimentos Portland

Sigla	Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CPI	100	-	-	-
CPI-S	95-99	1-5	1-5	1-5
CPII-E	56-94	6-34	-	0-10
CPII-Z	76-94	-	6-14	0-10
CPII-F	90-94	-	-	6-10
CPIII	25-65	35-70	-	0-5
CPIV	45-85	-	15-50	0-5
CPV-ARI	100-95	-	-	0-5

Fonte: ABCP (2002).

A composição atribuí a cada tipo de cimento Portland características específicas, tornando a utilização indicada para determinados usos. A ABCP (2009) segmenta os tipos de cimento e indicações de uso em obras de construção civil como:

- a) Cimento Portland comum: Cimento sem quaisquer adições além de gesso, indicada para obras em geral, em locais sem exposição a sulfatos do solo ou águas subterrâneas.
- b) Cimento Portland composto: Recomendado para obras com grandes lançamentos maciços de concreto onde há redução da capacidade de resfriamento da pasta. Apresenta satisfatória resistência a sulfatos presentes no solo.

- c) Cimento Portland de alto-forno: Possui aplicações para obras em geral, por apresentar boa impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, elevada resistência a compressão e resistência a sulfatos.
- d) Cimento Portland pozolânico: Possui emprego para diversificadas obras, por ser impermeável, durável e possuir alta resistência a compressão em idades avançadas.

2.1.4 Utilização

Os tipos de cimento podem ser utilizados nas mais diversas aplicações, e para a determinação do tipo mais apropriado deve-se levar em conta o ajuste de dosagens, análise de suas características, propriedades e sua influência sobre as argamassas e os concretos. Segundo a ABCP (2009), os tipos de cimento mais utilizados em obras de construção civil no Brasil são:

- a) Cimento Portland comum;
- b) Cimento Portland composto;
- c) Cimento Portland de alto-forno;
- d) Cimento Portland pozolânico;

E os menos utilizados são:

- a) Cimento Portland de alta resistência inicial;
- b) Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- c) Cimento Portland branco;
- d) Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- e) Cimento para poços petrolíferos.

Embora em sua maioria os cimentos sejam indicados para usos em geral, existem tipos de cimentos que são mais indicados ou vantajosos para determinados usos. Na Tabela 4, é descrito as aplicações dos cimentos Portland mais utilizados no Brasil.

Tabela 4 – Aplicação dos cimentos Portland

Tipos de Cimento	Aplicações
CPI	Construções em geral, quando não são necessárias propriedades especiais do cimento.
CP II	Obras em geral, como argamassa, concreto simples, armado ou protendido, pré-moldados e artefatos de cimento.
CPIII	Obras de concreto-massa como, barragens, peças de grande dimensões, obras em ambientes agressivos, tubos, canaletas, obras submersas e pavimentação de rodovias e aeroportos.
CPIV	Obras com alto volume de concreto e em locais expostos a água corrente e ambientes agressivos.

Fonte: ABCP (2009).

2.1.5 Processo produtivo

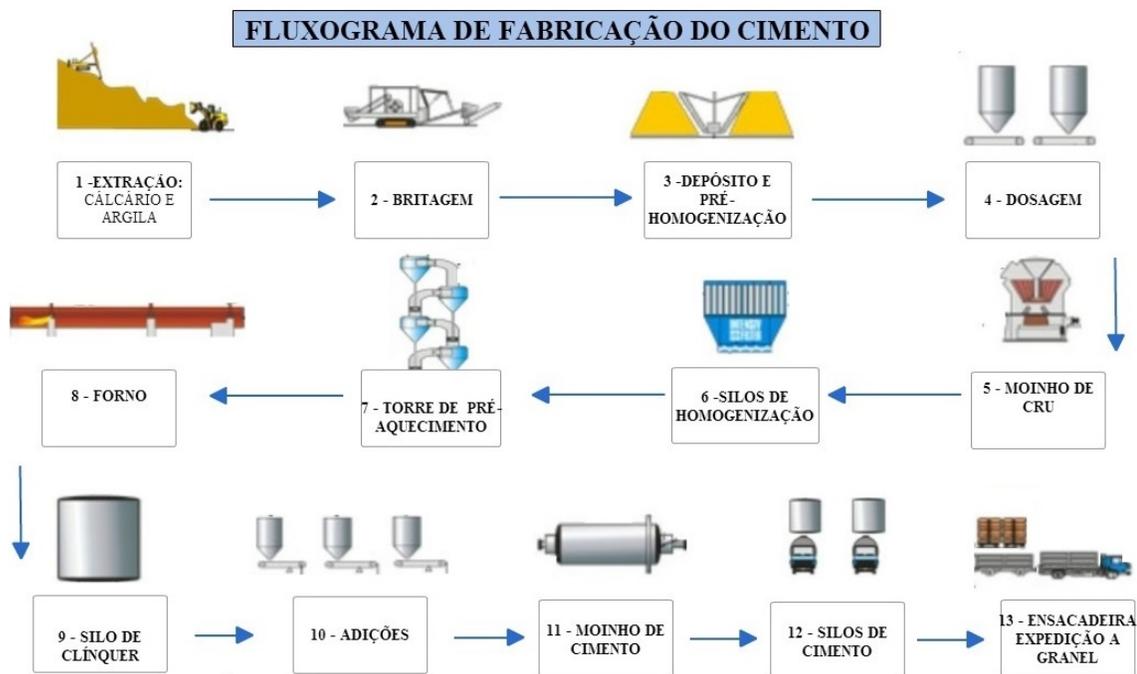
O processo de fabricação do cimento constitui-se basicamente de uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas, que através de processo químico transforma-se em clínquer. Após esta transformação é realizada a moagem e incorporação de outros materiais, de acordo com o tipo de cimento (IBC, 2012).

O processo de fabricação do cimento pode ser por via úmida, semiúmida, semi-seca ou seca. O processo através de via seca é usualmente utilizado na indústria cimentícia moderna, pois sua eficiência energética é maior que o processo de via úmida, uma vez que para 1 kg de clínquer o processo por via seca requer 800 kcal de energia fóssil e o processo por via úmida cerca de 1.400 kcal (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A fabricação de cimento no Brasil, em 99 % das instalações fabris, é feita através de processos de via seca, o que garante baixo consumo energético, pois é através do processo de secagem que 90 % da energia total de fabricação do cimento é consumida (IBC, 2012).

Na Figura 1, estão representadas de forma simplificada, através de fluxograma, as etapas do processo de fabricação de cimento por via seca.

Figura 1 – Fabricação do cimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de fabricação de cimento a seco de forma generalizada, constitui-se de treze etapas, descritas:

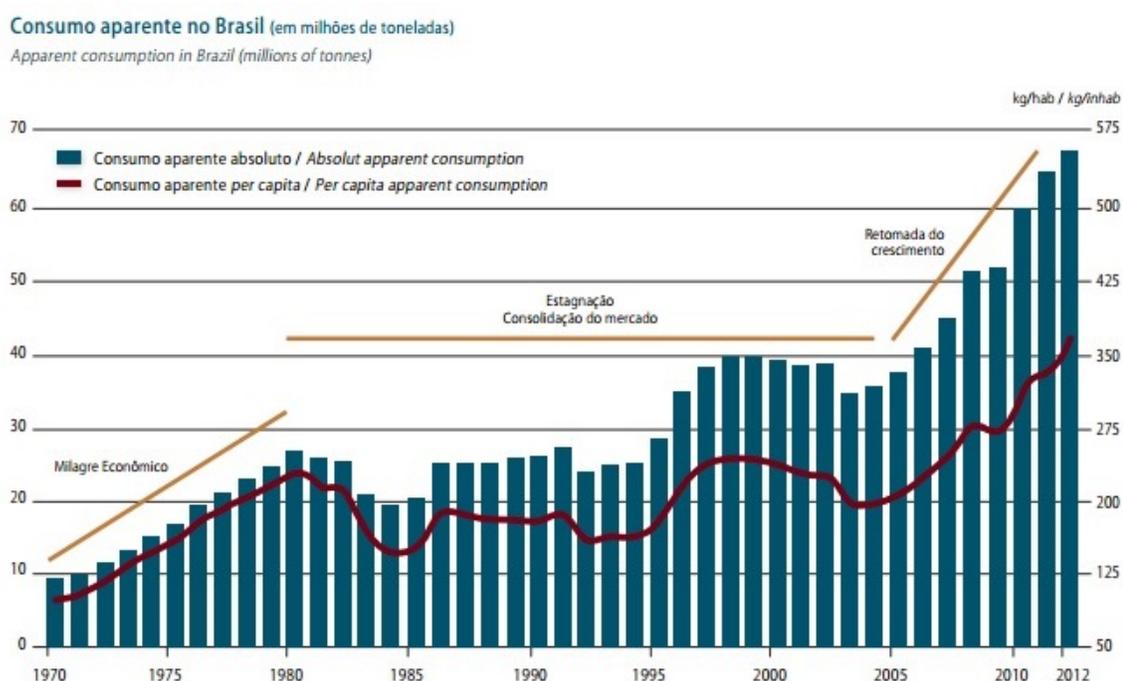
- 1) Extração da matéria prima: Extração de calcário e argila, no Brasil grande parte das jazidas de calcário é a céu aberto, nesta etapa são utilizados explosivos para o desmonte da rocha. A extração de argila em sua maior parte é feita através da movimentação de terras ou dragagens, quando for o caso. (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
- 2) Britagem: A matéria prima, quando rochosa, passa por moagem, até atingir a condição de grãos satisfatória para o processamento industrial. Uma quantidade considerável de impurezas são retiradas do calcário durante este processo. (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
- 3) Depósito e pré-homogeneização: Nesta etapa há um armazenamento das matérias primas, calcário e argila, separadamente. Após, ambos são processados para garantir uma pré-homogeneização (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
- 4) Dosagem: Após análise química dos materiais obtidos, são feitas dosagens para obtenção das proporções desejadas de compostos no clínquer. As matérias primas

- são dosadas em proporção de 75 a 85 % de calcário e 20 a 25 % de argila (IBC, 2012; MEHTA e MONTEIRO, 2008).
- 5) Moinho de cru: A matéria prima é processada através de moinho de bolas, rolo ou barras, onde é moída e homogeneizada, até resultar em um material fino (tamanho de 0,050 mm) e homogêneo denominado farinha (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
 - 6) Silos de homogeneização: São silos verticais de grande porte, onde a mistura é armazenada, e conduzida por vias pneumáticas e de gravidade. Este processo assegura uma homogeneização efetiva da mistura (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
 - 7) Torre de pré-aquecimento: A mistura homogenia é pré-aquecida pelos gases originários do forno (ABCP, 2009).
 - 8) Forno - clínquerização: Ocorre em forno rotativo com temperaturas de 1450 a 1550°C, onde as reações químicas, da mistura homogenia denominada farinha, conduzem a formação dos compostos do cimento. Após a retirada do forno o composto é resfriado até atingir uma temperatura de 80°C, nesta etapa se concluem as reações químicas para formação do clínquer. Esta etapa é considerada a mais importante durante o processo de fabricação do cimento, pois ela garante as características de resistência nas primeiras idades, o calor de hidratação, o início de pega e a estabilidade química do cimento (ABCP, 2009; BAUER, 2008).
 - 9) Silo de clínquer: O clínquer é estocado em silo até o próximo processo.
 - 10) Adições: Além do clínquer, componentes adicionais são armazenados em silos separadamente, dentre eles, gesso, escoria, pozolana, e calcário, para processamento posterior (ABCP, 2009).
 - 11) Moinho de cimento: Nesta etapa é adicionado ao clínquer o componente que resulta no cimento Portland desejado. Esta etapa garante que as partículas possuam tamanho de 10 a 15 μm .
 - 12) Silo de cimento: Nesta etapa o cimento resultante da etapa anterior é armazenado, onde passa por ensaios de qualidade que garantam sua expedição na etapa posterior (ABCP, 2009; MEHTA e MONTEIRO, 2008).
 - 13) Expedição: A expedição é feita a granel ou sacos de papel kraft de 50 kg (ABCP, 2009).

2.1.6 Impactos ambientais gerados durante o processo produtivo

De acordo com o SNIC (2013), a produção de cimento Portland no Brasil, no ano de 2012, chegou a 69,3 milhões de toneladas, o que significou um consumo de 353 kg/hab/ano, conforme demonstra a Gráfico 1.

Gráfico 1- Produção do cimento no período dos anos de 1970 a 2012



Fonte: SNIC (2012).

Em todo o seu processo de fabricação, o cimento gera impactos ambientais. Durante a extração de matéria prima nas jazidas causa desmoronamento, erosão e poluição da água de rios devido a emissões resultantes de substancias tóxicas. Através do processo de produção do clínquer, promove a liberação de gases como, dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), além de gases oxidantes, óxido nitrogenado, e compostos de chumbo. Estas emissões são próprias da produção de cimento, seja pelas reações químicas da transformação da matéria prima, ou pela queima de combustíveis para possibilitar esta transformação, estas emissões geram aquecimento global e poluição do ar (CARVALHO, 2008).

Segundo estudos internacionais, 5% das emissões de CO₂ pelo homem possuem origem na produção de cimento mundial, no Brasil este valor é de 1,4 %, e a tendência mundial é que a produção de cimento aumente, principalmente nos países emergentes, o que deverá resultar em políticas de controle de emissões atmosféricas no setor (SNIC, 2013). Pela alta demanda de consumo de cimento é importante que sejam feitas pesquisas científicas que busquem alternativas que minimizem os impactos ambientais gerados por sua fabricação. Pois embora a construção civil gere grande impacto ambiental em suas atividades também possui elevado potencial para consumo de resíduos de outros segmentos industriais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Conforme Jahren⁴ (2003) apud Cordeiro (2009) estima-se que em 2020 a produção de cimento mundial chegue a 2,5 bilhões de toneladas, o que alavancaria as emissões de dióxido de carbono e os demais gases poluentes. Como uma opção para o beneficiamento econômico e redução do impacto ambiental, gerado durante o processo produtivo do cimento, muitos países utilizam subprodutos como adições minerais. O mesmo autor cita que a incorporação das seguintes adições ao clínquer poderia ser uma alternativa, e contribuiria para a destinação de milhões de toneladas de subprodutos, de acordo com o apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade anual de subprodutos gerados no mundo

Subprodutos	Geração (milhões de toneladas)
Cinza Volante	500
Filer Calcário	170
Escória de Alto Forno	75
Pozolanas Naturais	50
Outras Cinzas	25
TOTAL	820

Fonte: SNIC (2012).

Segundo Cordeiro (2009) a utilização de cinza volante, como adição mineral, contribuiria para a destinação de 500 milhões de toneladas deste resíduo, o que reduziria a fabricação de clínquer em aproximadamente 400 milhões de toneladas, e a exploração de 300 milhões de toneladas de calcário e 100 milhões de toneladas argila. Levando em consideração que o clínquer corresponde em média a 80 % da constituição do cimento, e sua constituição se

⁴ JAHREN, P. **Greener Concrete – What are the Options ?** SINTEF Report n. STF-A03610, 2003.

baseia em aproximadamente 75 % de calcário e 25 % de argila (IBC, 2012; METHA E MONTEIRO, 2008).

2.2 Adições Minerais

As adições minerais caracterizam-se por materiais que apresentam reação pozolânica ou cimentante, que podem ser incorporados em argamassas ou concretos em proporções que variam de 20 a 70 % por massa de material cimentício total. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Dal Molin (2011), as adições minerais são classificadas quanto a sua reação físico-química, como:

- a) Material Pozolânico: materiais silicosos ou silico-aluminosos, finamente divididos que, na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio constituindo compostos com características aglomerantes.
- b) Material cimentante: materiais que não necessitam da presença de hidróxido de cálcio no cimento para constituir produtos como C-S-H. Contudo, a hidratação ocorre de forma lenta e a qualidade dos produtos cimentantes formados não é ideal para a utilização do material com fins estruturais.
- c) Fíler: material finamente dividido sem atividade química, sua reação baseia-se ao efeito físico de empacotamento granulométrico, com pontos de nucleação para a hidratação do cimento.

Isaia (2007) atribui aspectos vantajosos às adições minerais como, aumento da durabilidade as condições de serviço, vantagens econômicas e sustentabilidade na cadeia da construção civil.

2.2.1 Pozolana

As primeiras evidências sobre a utilização de pozolana foram encontradas nas construções gregas da Ilha de Creta, há aproximadamente 2.000 anos a.C., onde foram utilizados fragmentos de cerâmica (argila calcinada) em argamassas (MEHTA, 1987).

Segundo Kaefer (1998), a origem do nome pozolana deve-se ao fato de que em aproximadamente 300 a.C., em Pozzuoli, Itália, próximo ao Monte Vesúvio, a utilização de cinza vulcânica ficou popularmente conhecida por ter sido utilizada para construir a Via Ápia, aquedutos, e o Coliseu, onde foi relatada a utilização de 1:2 de cal e pozolana.

A partir de então o termo pozolana era atribuído a materiais naturais de origem vulcânica, que possuíam propriedades semelhantes a cinza vulcânica da cidade de Pozzuoli, mas posteriormente esta definição passou a abranger outros materiais, que embora possuam origem distinta, apresentam comportamento semelhante, quanto à reação com cal na presença de água (MASSAZZA, 1993).

No Brasil, o primeiro registro de utilização de pozolana foi durante a construção de barragens, onde foram utilizadas cinzas volantes provenientes das termelétricas de Charqueadas e Candiota, localizadas no estado do Rio Grande do Sul (PRISZKULNIK, 1981).

De acordo com a NBR-12653 (ABNT, 2014), pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que não possuem atividade cimentícia por si só, mas que finamente divididos, em temperatura ambiente, e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio, resultando a formação de compostos cimentícios.

A Pozolana é um material natural ou artificial, que quando é incorporado a argamassas e concretos origina alterações nas características tecnológicas, o que resulta em propriedades superiores aos produtos sem incorporação de pozolana (SOUZA SANTOS, 1989). A resistência e durabilidade da pozolana como material cimentante pode ser testemunhado através das ruínas de obras romanas, que são relíquias que resistem ao tempo até os dias atuais (BAUER, 2008).

2.2.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos

As pozolanas se dividem em dois grupos quanto a sua origem, sendo natural ou artificial (MEHTA, 1987). A NBR 5736 (ABNT, 1991) define como naturais as pozolanas de origem vulcânica ou sedimentar, e como artificial as pozolanas resultantes de tratamento térmico ou subprodutos industriais.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), todas as pozolanas naturais possuem origem rochosa ou vulcânica, exceto a terra diatomácea. O processamento para utilização como adição geralmente envolve britagem, moagem, seleção por tamanho e ativação térmica, quando necessário. As pozolanas artificiais são subprodutos que exigem ou não algum processamento antes de ser utilizado como adição assim como secagem e pulverização.

Os mesmos autores citam como exemplo de materiais pozolânicos naturais os vidros e tufos vulcânicos, as argilas e folhelhos calcinados e as terras diatomáceas, e como exemplo de materiais pozolânicos artificiais a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa, e a cinza da casca de arroz. A NBR-12653 (ABNT, 2014) classifica os materiais pozolânicos quanto a sua origem, dividindo em três classes, descritas da seguinte forma:

- a) Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.
- b) Classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoelétricas.
- c) Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

E as exigências físicas, químicas e de índice de atividade pozolânica, conforme a Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6 – Exigências físicas

Propriedades	Classes		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

Tabela 7 – Exigências químicas

Propriedades	%	Classes de materiais pozolânicos		
		N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	mín.	70	70	50
SO ₃	máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de Umidade	máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo	máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

Tabela 8 - Determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos.

	Índice de Atividade Pozolânica:		
	N	C	E
Com Cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Com Cimento aos 28 dias, (% mínima)	75	75	75
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2014)

A American Society for Testing Materials (ASTM C 618-95) classifica os materiais pozolânicos da seguinte forma:

- a) Classe N: cruas ou calcinadas, oriundas de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos; turfos vulcânicos e argilas.
- b) Classe F: Cinza volante produzida pela incineração de carvão betuminoso ou antracito, tendo atividade pozolânica.
- c) Classe E: Cinza oriunda de carvão betuminoso ou lignina, apresentado propriedades pozolânicas e cimentantes.

A caracterização de um material quanto às três classes depende das propriedades químicas e físicas pré-estabelecidas do material em análise, devendo atingir os parâmetros mínimos para o ser considerado pozolânico.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as classes F e E diferenciam entre si de acordo com o teor de cálcio. Sendo a classe F composta por menos de 10% de CaO e classificada como cinza de baixo teor de cálcio. E a classe E composta por 15 a 40% de CaO, classificada

como cinza de alto teor de cálcio. Os autores atribuem a reação das cinzas com baixo teor de cálcio menor reação pozolânica, e as cinzas com alto teor de cálcio maior de reação pozolânica.

2.2.3 Atividade Pozolânica

O termo atividade pozolânica compreende todas as reações que envolvem os constituintes dos componentes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio e água; em geral este termo está relacionado a dois fatores, que são: quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que tal combinação se processa (MASSAZZA, 1993, p. 187).

A atividade pozolânica é uma reação que se desencadeia devido à fraqueza e instabilidade da reatividade da sílica e da alumina com o hidróxido de cálcio, por meio de ligações estruturais no material original (MALQUORI, 1960).

De forma simplificada pode-se explicar a atividade pozolânica como, uma instabilidade gerada no sistema composto de cal, pozolana e água, através da qual, em temperatura ambiente, são geradas diversificadas reações seguidas de endurecimento do sistema e do aumento da resistência mecânica (KIHARA, 1982). Em curto período a atividade pozolânica esta relacionada à superfície específica, e em longo prazo ao conteúdo de sílica e alumina reativa da pozolana (KIHARA, 1986). Para BAUER (1993), na presença de cimento, os materiais pozolânicos, desenvolvem propriedades aglomerantes potenciais.

De acordo com Dal Molin (2005), a adição pozolânica no cimento Portland gera alterações das propriedades reológicas e micro e macroestruturais, podendo trazer benefícios ou não. A maior parte destas alterações esta ligada a granulometria fina das adições (efeito físico), a atividade pozolânica (efeito químico), ou o ajuste de ambos.

As pozolanas são utilizadas geralmente através de duas formas, como substituição parcial do cimento, ou como adição em proporções variáveis em relação à massa ou volume

do cimento (SILVEIRA⁵, 1996 apud SANTOS, 2006), mas embora sendo distintas as duas formas de incorporação, a reação pozolânica e os benefícios gerados são os mesmos (MEHTA, 1987).

Segundo Castro (2008), a pozolana possui como principal propriedade sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio (CH), o que gera compostos estáveis e com características aglomerantes. Assim, no cimento Portland, o hidróxido de cálcio (CH) liberado durante a hidratação dos silicatos reage com a pozolana, incorporada parcialmente no cimento, o que gera uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que possuem mais estabilidade que o cimento hidratado. A substituição parcial de cimento Portland por pozolana possui capacidade de manter ou aumentar as características de resistência mecânica e durabilidade.

Mehta e Monteiro (2008) fazem uma comparação entre o cimento Portland e o cimento Portland pozolânico demonstrando a principal reação, chamada reação pozolânica ou química, durante a formação de cálcio hidratado (C-S-H), e através dela é possível compreender a diferença de comportamento entre o cimento Portland e o cimento Portland pozolânico.

a) Cimento Portland:



b) Cimento Portland Pozolânico:

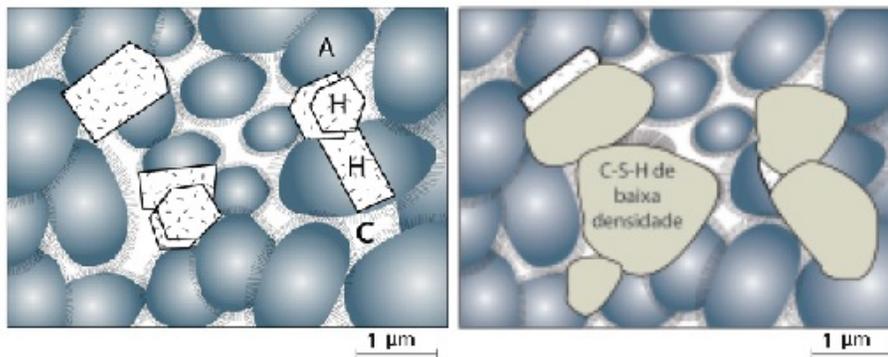


Na Figura 2 é feita uma representação esquemática composta por duas pastas de cimento hidratadas onde, (i) cimento sem adição pozolânica e (ii) cimento com adição pozolânica. Na “i” são denominados, “A” agregação de partículas pouco cristalinas C-S-H, “H” produtos cristalinos como grandes cristais, “C” cavidades capilares e vazios que

⁵ SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

compreendem espaços ocupados com água que em maior parte não são completamente preenchidos.

Figura 2 – Representação das pastas de cimento (i) sem adição e (ii) com adição pozolânica.



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

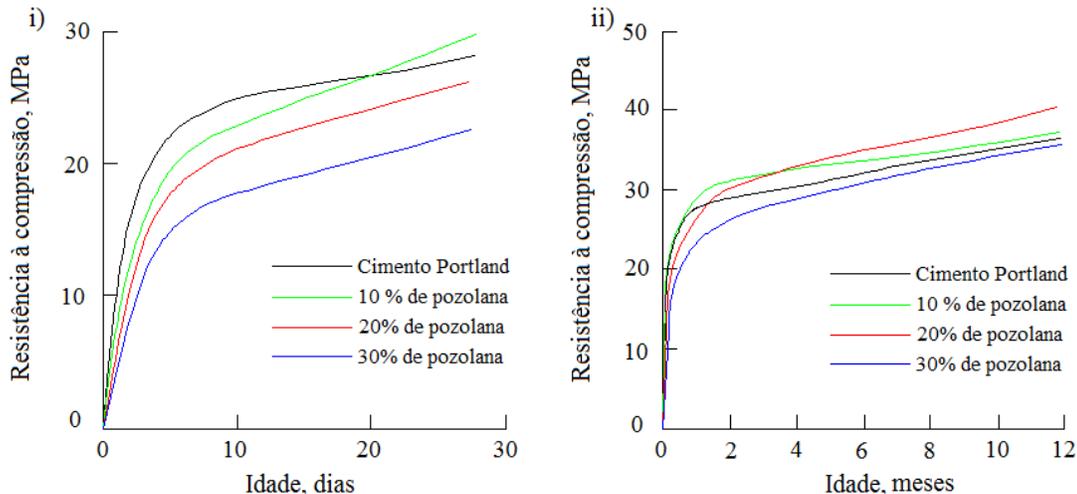
A partir da comparação entre as duas pastas de cimento hidratado (i e ii), da Figura 2, obtemos que a resultante da reação pozolânica eliminou os vazios capilares ou reduziu seu tamanho, e os cristais do hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H extra de baixa densidade.

O mesmo autor cita que na reação do cimento Portland pozolânico a reação é lenta o que garante que as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também são lentas, a reação consome hidróxido de cálcio (CH) ao invés de produzi-lo, o que garante durabilidade da pasta hidratada perante os ambientes ácidos, o resultado das reações garante eficiência no preenchimento de espaços capilares, o que melhora a resistência à impermeabilidade do sistema.

A reação física da pozolana chamada reação Fíler age no preenchimento de vazios de concretos e argamassas, e o efeito de nucleação age na velocidade de hidratação das partículas de cimento Portland nos primeiros dias de cura. Esta reação garante que uma quantidade maior de hidratos, fazendo com o número de hidróxido de cálcio (CH) seja elevado neste período, incrementando posteriormente a reação pozolânica. A quantificação de forma separada das reações físicas e químicas das pozolanas não é possível, uma vez que as reações possuem relação direta entre si (MARTINEZ, 2006).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as reações pozolânicas ligadas ao desenvolvimento da resistência em cimentos contendo 10, 20 e 30% de pozolana mostram que após os sete dias de hidratação as pozolanas contribuem para um ganho no aumento de resistência. A cura úmida em longos períodos de cimentos com adição pozolânica é mais elevada do que as de cimentos sem adição. Esta característica é adquirida através do aumento de C-S-H e os demais produtos de hidratação. A Gráfico 2 representa o ganho de resistência em diferentes idades do cimento Portland de referencia e cimento Portland com diferentes porcentagens de pozolana.

Gráfico 2 - Gráficos de resistência à compressão.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

O mesmo autor cita que o aumento da durabilidade aos sulfatos ou a ambientes ácidos de cimentos com adições pozolânicas esta ligado ao efeito conjugado de uma maior impermeabilidade e da diminuição do teor de hidróxido de cálcio.

2.2.4 Vantagens da utilização de materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos geram energeticamente mais economia que a produção do clínquer, matéria prima do cimento Portland, e contribuem para a destinação de subprodutos

industriais, como por exemplo, a cinza volante conduzida pelos gases de exaustão das termelétricas (ZAMPIERI, 1989).

A má destinação de subprodutos industriais com características pozolânicas seria um desperdício, já que possuem potencial para a utilização no processo de fabricação de cimentos Portland compostos, ou como adição mineral em matrizes de concreto.

A incorporação de pozolana em matrizes cimentícias beneficia três aspectos ligados a reação pozolânica como, aumento da resistência a fissuração térmica, aumento da resistência final, e durabilidade diante de ambientes ácidos, devido ao aumento de impermeabilidade do sistema (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Entretanto, de acordo com Oliveira (2012), para que as adições minerais no cimento Portland se tornem benéficas se faz necessário à determinação das características físicas e mineralógicas da pozolana, utilização e dosagem, condições de cura, temperatura, e a relação água / aglomerante + adição.

2.3 Material de Subproduto: Cinza Volante

Atualmente, a cinza volante é o principal resíduo industrial no mundo, gerando por ano cerca de 500 milhões de toneladas, sua geração é impulsionada por países como China, Índia, Estados Unidos, Rússia, Alemanha, África do Sul, e Reino Unido. E sua adição é adequada para a matriz do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

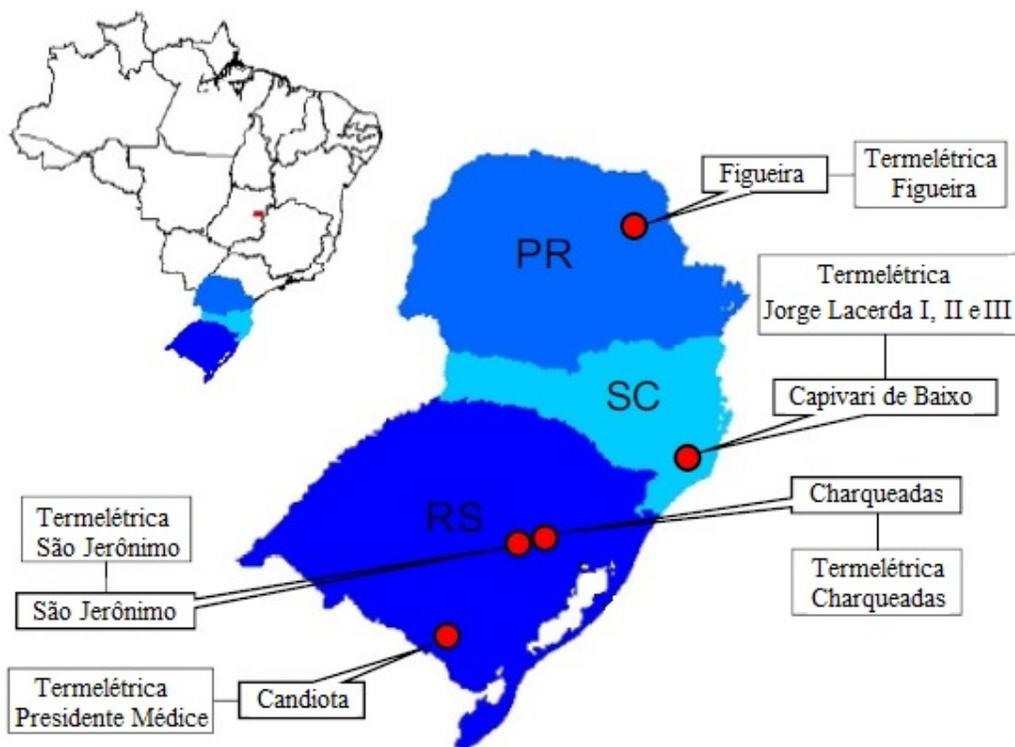
Silva et al. (1997), denomina que o crescimento da produção de cinzas é abundante, pois o carvão possui fácil extração, tecnologia de queima difundida e inexistência de outras fontes de energia que possam substituir o baixo custo do carvão.

O carvão brasileiro, devido sua composição e qualidade, possui utilização basicamente para a produção de energia em indústrias, sendo consumido principalmente por usinas termelétricas e por indústrias de cimento, cerâmica, papel e celulose (BROWN, 2011).

No Brasil a geração de energia elétrica através de usinas termelétricas é uma alternativa eficiente, uma vez que esta fonte independe de condições climáticas. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2013), em 2012 as usinas termelétricas corresponderam a 27,1% da potência nacional gerada, sendo que 2,1% das termelétricas possuem como fonte de energia o carvão.

As usinas termelétricas brasileiras que utilizam carvão mineral, em sua maioria localizada no Rio Grande do Sul, são as principais geradoras de cinza volante. Na Figura 3, são indicadas as termelétricas localizadas em toda região sul do país.

Figura 3 – Localização das termelétricas



Fonte: Hoppe Filho (2008).

Embora o carvão seja um material combustível de baixo valor econômico muito se discute sobre sua utilização na geração de energia, pois sua combustão gera poluição nas imediações da usina, como cinzas, que podem conter elementos tóxicos, e gases do efeito estufa. Como o carvão brasileiro em sua grande parte é composto por matéria mineral, 100 toneladas de carvão produzem cerca de 50 toneladas de cinza (BROWN, 2011).

De acordo com Silva (2011), a disposição das cinzas geradas no processo de queima das termelétricas, até o ano de 1990, era feita em depósitos nos arredores das fontes geradoras. Através da pressão da sociedade e ações dos órgãos governamentais e ambientais atualmente a disposição de grande parte das cinzas é feita em depósitos, bacias de decantação, e cavas de minas desativadas e 34 % das cinzas são comercializadas para o setor da construção civil.

2.3.1 Cinzas

A formação das cinzas se dá a partir da combustão direta de carvão fóssil, o qual é uma matéria prima constituída de componentes orgânicos e minerais. A matéria orgânica representa a fração de material volátil e carbono fixo e a matéria mineral representa a fração de material argiloso, quartzo, piritas, carbonatos, etc. (ROHDE et al.,2006).

As cinzas são constituídas de matéria não combustível do carvão e de partículas não queimadas, devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na câmara de combustão, em temperatura entre 1200 a 1600 °C (POZZOBON, 1999).

A combustão do carvão fóssil origina dois tipos de cinzas, a cinza volante ou leve e a cinza pesada ou de grelha. A cinza volante é assim denominada por ser recolhida nos gases de exaustão da caldeira, e a cinza pesada por se depositar no piso da câmara de combustão (ISAIA, 2007).

O mesmo autor cita que a cinza volante possui granulometria mais fina e o processo de resfriamento mais rápido, possuindo sua composição mineralógica predominante vítrea, com 60 % a 85% de sílica amorfa, enquanto a cinza pesada possui granulometria de uma areia grossa e o resfriamento mais lento, com composição mineralógica predominantemente cristalina e com baixo potencial aglomerante.

A cinza volante caracteriza-se por um resíduo sólido, finamente dividido, arrastado através do fluxo dos gases da combustão e coletado nos precipitadores eletrostáticos,

correspondendo a cerca de 80 % da cinza total gerada durante o processo de combustão (KIHARA, 1986; SILVA et al., 1999).

A cinza pesada distingue-se por um resíduo grosseiro que é armazenado no fundo da fornalha, em tanques de resfriamento, sendo retirada por fluxo de água, compondo cerca de 20% da cinza total gerada (SILVA et al., 1999).

Embora a cinza pesada e a volante sejam subprodutos gerados em grande escala, a maior parte dos estudos realizados são sobre a cinza volante, pelo fato das características físicas da cinza volante serem favoráveis, necessitando o mínimo beneficiamento para a sua utilização como substituição parcial de cimento e devido a facilidade de estocagem em silos. Para a utilização da cinza pesada com o mesmo propósito seria necessário que a cinza fosse submetida à moagem e secagem prévia, o que elevaria o custo do produto (KREUZ, 2002).

2.3.2 Cinza Volante

As cinzas volantes são materiais finamente divididos oriundos da combustão de carvão pulverizado ou granulado NBR-12653 (ABNT, 2014), que apresentam características pozolânicas (ISAIA, 2007).

De acordo com Kihara (1983), as cinzas volantes caracterizam-se como pozolana, pois na presença de água possuem capacidade de reação com cal, o que origina a formação de novos compostos com propriedades aglomerantes.

As diferenças significativas na composição mineralógica e nas propriedades dividem as cinzas volantes em duas categorias, que se diferenciam principalmente pelo teor de cálcio. As cinzas com baixo teor de cálcio possuem menos de 10 % de CaO e são, geralmente, produto de combustão de antracito⁶ e carvões betuminosos, e as cinzas com alto teor de cálcio

⁶ Antracito é uma variedade compacta e dura do mineral carvão que possui elevado lustre. Difere do carvão betuminoso por conter pouco ou nenhum betume, o que faz com que arda com uma chama quase invisível. Os espécimes mais puros são compostos quase inteiramente por carbono.

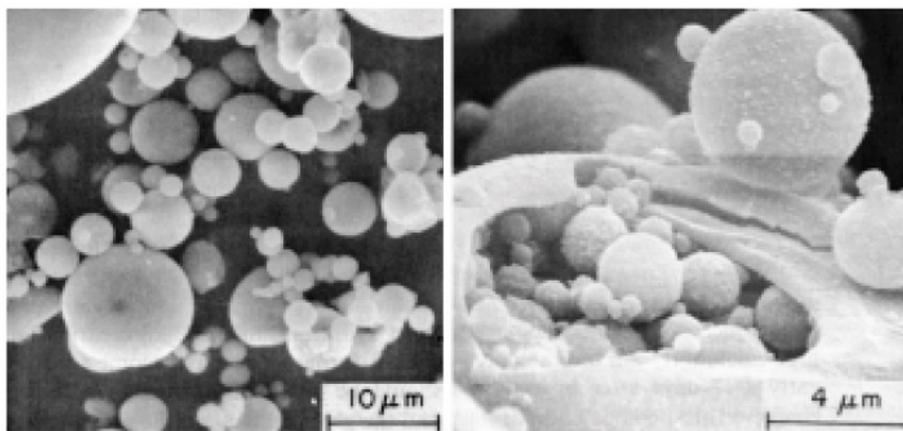
que possuem 15 a 40% de CaO, geralmente produtos de combustão de carvões de lignita⁷ e sub-betuminosos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Cassal (2000), para um material ser pozolânico é necessário que sua constituição química seja a base de sílica ou alumínio e que estes proporcionem reatividade com hidróxido de cálcio.

A reatividade de uma pozolana é influenciada pelo teor de vidro, uma cinza volante de boa qualidade pode apresentar de 70 % a 85 % da fase vítrea, apresentando fases cristalinas, como quartzo, mulita, hematita e magnetita (ISAIA, 2007).

A maioria das partículas da cinza volante são constituídas de esferas sólidas de vidro e a minoria de esferas ocas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). As esferas ocas podem estar vazias ou preenchidas com outras esferas menores. Os diâmetros das esferas variam de $< 1 \mu\text{m}$ a até próximo a $100 \mu\text{m}$, sendo a maior porção, superior a 50%, inferior a $20 \mu\text{m}$ (ISAIA, 2007). A Figura 4 demonstra que em maior parte as partículas de cinza volante aparecem como esferas sólidas, (i) partículas vítreas esféricas e (ii) plerosfera⁸.

Figura 4 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

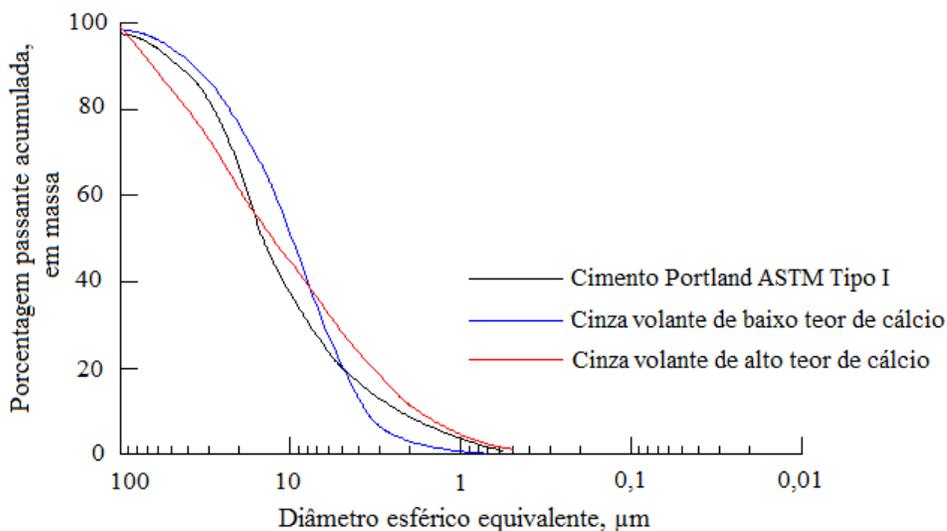
De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a mineralogia das cinzas é diversificada, pois varia de acordo com a composição do carvão, ambiente de armazenamento e condições de

⁷ Lignita é uma variedade de carvão fóssil, carbonoso, que conserva muitas vezes a forma das plantas que lhe deram origem.

⁸ Plerosferas são esferas repletas de esferas reduzidas no seu interior.

calcinação. O Gráfico 3 faz uma comparação entre as dimensões das partículas de cimento Portland e das cinzas volantes de baixo e alto teor de cálcio.

Gráfico 3 - Gráfico de comparação das dimensões de partículas



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

O mesmo autor cita que as características de variação de dimensão da partícula, morfologia e superfície da cinza volante, influencia consideravelmente sobre a necessidade de água, a trabalhabilidade em estado fresco e na velocidade de desenvolvimento da resistência da pasta de cimento.

A finura da cinza volante é o principal fator que afeta sua qualidade, podendo contribuir para a resistência, pela redução direta de água, incremento do volume na pasta de mistura e atividade pozolânica (CANON, 1968).

3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

O programa experimental para verificação do potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial do cimento foi feito em quatro etapas, onde foram ensaiadas a resistência a compressão de corpos cilíndricos de argamassa, constituídas ou não de cinza volante, e suas características físicas e mineralógicas. Os ensaios foram, em sua maioria, realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) da Univates, e os demais em laboratórios específicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1ª etapa: Foi realizada a coleta do material, cinza volante e cimento, nas sedes das empresas, seu acondicionamento, transporte até o laboratório e realização das etapas preliminares a moldagem dos corpos de prova.

2ª etapa: Moldagem dos corpos de prova, para a determinação do índice de atividade pozolânica da cinza volante com cimento Portland aos 3, 7, 28 e 63 dias. O ensaio teve como referencia uma amostra padrão sem adição de cinza volante, composta por 16 corpos de prova, e uma amostra com 25% de cinza volante em substituição igual a porcentagem em massa de cimento, composta por 16 corpos de prova, essa proporção foi definida a partir do limite máximo estipulado pela NBR-5752 (ABNT, 2014).

3ª etapa: Foi feita a ruptura dos corpos de prova, para obtenção da resistência a compressão simples da argamassa nas idades estipuladas, concluindo assim o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, que é o objetivo principal da pesquisa proposta no presente trabalho.

4ª etapa: Foram executados os ensaios de caracterização da cinza volante, quanto à granulometria e parâmetros físicos mínimos exigidos pela NBR-12653 (ABNT, 2014), estes ensaios foram realizados a fim de complementar a análise e argumentação dos resultados obtidos no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.

Todas as etapas desenvolvidas durante a execução dos ensaios possuíram importância como incremento do objetivo final do trabalho.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados; cimento Portland CII-F-32 , cinza volante, areia normal e água. Os materiais encontram-se caracterizados a seguir.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland Composto com Fíler - CII-F-32. A escolha da marca de cimento Portland foi feita levando em conta a possibilidade de fornecimento de amostra do produto, por parte da fabricante.

A justificativa pela escolha deste tipo de cimento teve em vista que seu emprego é estabelecido pela NBR-5752 (ABNT, 2014), e sua composição não possui adição pozolânica. As características físico-químicas do cimento estão em conformidade com as exigências da NBR-11578 (ABNT, 1991), conforme consta nas Tabelas 9 e 10, que são um comparativo entre as características exigidas pela NBR-11578 (ABNT, 1991) e o relatório de ensaios do cimento fornecido pelo fabricante.

Tabela 9 – Exigências químicas, físicas e mecânicas: NBR-11578 (ABNT,1991).

MgO	SO ₃	CO ₂	Perda ao Fogo (PF)	Resíduo Insolúvel (RI)		
Limites (% em massa)						
≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 6,5	≤ 2,5		
Tempo de início de pega	Expansibilidade a quente	Finura		Resistência à Compressão		
		Resíduo na peneira 75 µm	Área específica	Idade		
h	mm	%	m ² /kg	3 dias	7 dias	28 dias
≥ 1	≤ 5	≤ 12	≥ 260	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0

Fonte: NBR-11578 (ABNT, 1991).

Tabela 10 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CII-F-32.

MgO	SO ₃	CO ₂	Perda ao Fogo (PF)	Resíduo Insolúvel (RI)		
Limites (% em massa)						
4,57	2,67	-	5,07	1,39		
Tempo de início de pega	Expansibilidade a quente	Finura		Resistência à Compressão		
		Resíduo na peneira 75 µm	Área específica	Idade		
h	mm	%	m ² /kg	3 dias	7 dias	28 dias
3:56	0,25	1,5	332,9	29,5	35,7	42,9

Fonte: Relatório de Ensaios de Cimento fornecido pela Cia. Itambé de Cimento.

3.1.2 Agregado miúdo

A areia empregada possui origem do rio Jacuí, adquirida no mercado comercial da região do Vale do Taquari, disponibilizada no Laboratório de Tecnologia da Construção, do Centro Universitário Univates, Lajeado/RS. Antes do emprego na execução da argamassa, o agregado foi peneirado e seco em estufa, de acordo com o proposto pela NBR-7214 (ABNT, 2012), definida através de quatro faixas granulométricas estipuladas como; areia grossa, média grossa, média fina e fina, com dimensões consecutivamente de 2,4 – 1,2 mm, 1,2 – 0,6 mm, 0,6 – 0,3 mm e 0,3 mm – 0,15 mm, cada uma representando 25 % de massa da quantia total. A Figura 5 possibilita a visualização do peneiramento e a separação do agregado de acordo com sua faixa granulométrica.

Figura 5 – Peneiramento e separação como; areia grossa, média grossa, média fina e fina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Cinza Volante

A cinza volante utilizada foi fornecida pela empresa Pré-Concretos Engenharia, localizada na cidade de Porto Alegre/RS, sendo originária da Usina Termelétrica Presidente Médici - UTPM - Candiota II, situada no município de Candiota/RS. A cinza adquirida pela empresa é gerada através do processo de queima por injeção de carvão mineral pulverizado, abastecido pela Cia Riograndense de Mineração, localizada junto à usina termelétrica. A cinza volante foi coletada na sede da empresa Pré-Concretos Engenharia, disponibilizada em um saco de 10 kg, não foi necessário nenhum processamento prévio antes da utilização da cinza volante na argamassa. Na Figura 6 é possível visualizar a amostra de cinza volante doada pela empresa.

Figura 6 - Cinza Volante disponibilizada na sede da empresa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Água

A água utilizada na mistura das argamassas é proveniente da rede de abastecimento público de Lajeado/RS, fornecida pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.2 Metodologia

A metodologia desenvolvida compreendeu os ensaios de caracterização físico-mineralógica, onde foi empregada uma parte da cinza volante coletada. E a moldagem de 32 corpos de prova de argamassa, para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, onde foram utilizados o cimento Portland, a areia, a água e a cinza volante.

3.2.1 Análise mineralógica

A caracterização mineralógica da cinza volante foi feita através da técnica de difração de raios X – DRX, o ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este ensaio foi realizado para determinar os minerais constituintes da amostra de cinza volante. O ensaio compreendeu a absorção de raios X por parte do material durante a agitação dos átomos que emitiram uma radiação secundária. Durante a emissão de radiação, foram gerados comprimentos de ondas que possibilitam caracterizar os elementos e as proporções dos minerais que compõem a amostra de cinza volante, e a incidência ocorrente de halos amorfos⁹ na amostra.

3.2.2 Análise granulométrica

Para a determinação da granulometria da cinza volante foi utilizado o equipamento 1180 LD, da marca CILAS, o ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da UFRGS. A análise consiste na técnica de difração a laser, onde a amostra é submetida a um sistema de dispersão e um sistema de focal, onde a amostra é disponibilizada em um fluido (no caso álcool isopropílico) que serve como meio dispersante. Após, a amostra é submetida a um raio laser que sofre difração, onde varia de acordo com o tamanho das partículas. A faixa granulométrica analisada pelo equipamento varia de 0,04 µm a 2.500 µm, e as distribuições correspondem aos diâmetros concentrados em 10%, 50% e 90%. A inclinação da curva é proporcional a graduação do material, portanto quanto maior a inclinação da curva maior será a variedade dimensional das partículas. Na Figura 7 é possível observar um modelo do equipamento 1180 LD, da marca CILAS.

⁹ São denominados amorfos os compostos químicos que não apresentam estrutura regular definida. O contrário são arranjos ordenados e sem presença de falhas, denominados Cristalinos (DANA, 1983).

Figura 7 - Equipamento: Analisador granulométrico - CILAS 1180 LD



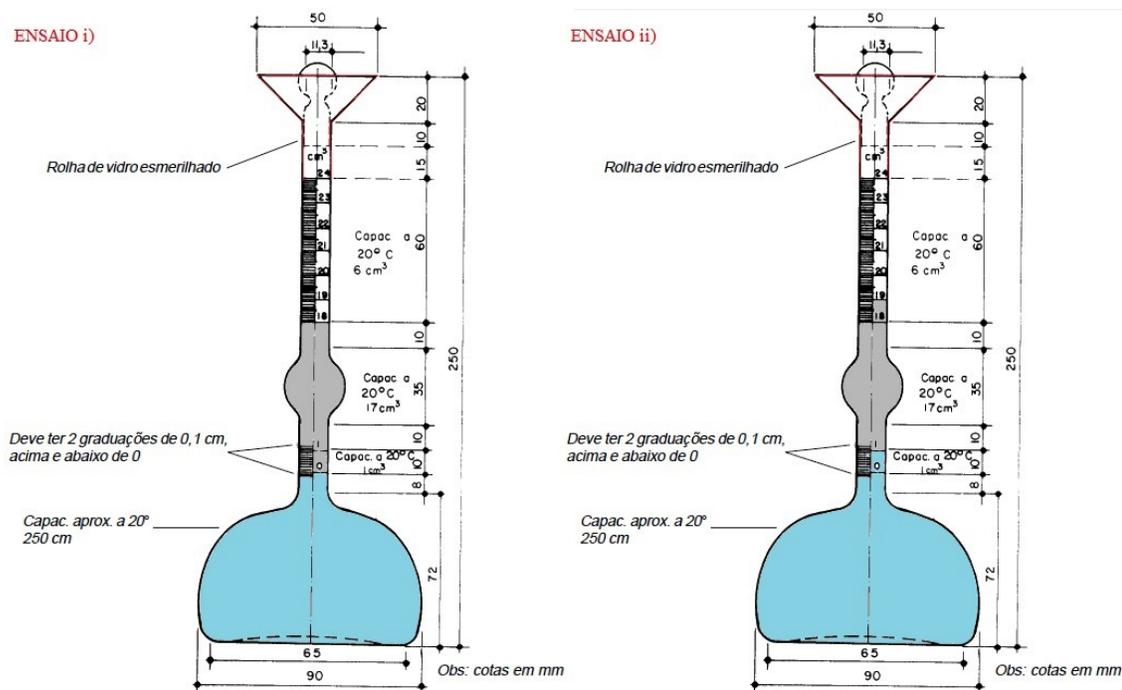
Fonte: Cruz (2008).

3.2.3 Análise da massa específica

Para a consignação da massa específica da cinza volante foram feitos os procedimentos estabelecidos na NBR NM-23 (ABNT, 2001), que estipula o método de determinação da massa específica do cimento Portland, e outros materiais em pó, através da utilização do frasco volumétrico Le Chatelier. O ensaio foi realizado no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS.

Esse método possibilitou a obtenção da massa através do deslocamento do líquido incidente na parte interna do recipiente. A Figura 8 possibilita a visualização de um esquema que facilite a compreensão da execução dos ensaios, das amostras 1 e 2, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier.

Figura 8: Frasco volumétrico de Le Chatelier, ensaios “i” e “ii”.



Fonte: NBR NM-23 (ABNT, 2001), modificada pelo autor.

O ensaio “i” representado na Figura 11, ilustra o frasco preenchido com o líquido não reagente até a marca de 0 cm³, após o frasco foi submerso em água por 30 minutos, a água utilizada deve estar com a mesma temperatura do laboratório. Então o volume 1 (V_1) foi medido, após foi adicionado a cinza volante, e o frasco foi tampado, movimentos circulares foram feitos até que não houvessem bolhas de ar na superfície do líquido. O frasco foi novamente colocado em banho termorregulador com água por 30 minutos, e então o volume 2 (V_2) foi medido. O procedimento foi repetido no ensaio “ii”, possuindo como única diferença, o preenchimento, com o líquido não reagente, feito até a marca de 1 cm. Após os ensaios “i” e “ii” foram repetidos para a amostra 2. O valor da massa específica foi definido através da média resultante da repetição do ensaio, quando os resultados obtidos não se diferenciaram

entre si com valor superior a 0,01 g/cm³. A massa específica foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \text{ onde,} \quad (1)$$

ρ = massa específica do material, em g/cm³;

m = massa do material ensaiado, em g;

$V_2 - V_1$ = volume deslocado pela massa do material ensaiado, em cm³.

3.2.4 Superfície específica

O ensaio de finura ou superfície específica, da cinza volante foi executado através do método BET, o método fundamenta-se na adsorção física das moléculas de um gás inerte nas superfícies internas e externas de todos os poros abertos e interligados das partículas da cinza volante ensaiada. O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da UFRGS. A unidade é expressa em metro quadrado por quilograma.

3.2.5 Avaliação da pozolanicidade

Para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foram feitos ensaios conforme determinação da NBR-5752 (ABNT, 2014), os ensaios foram executados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC), da Univates. Onde o grau de pozolanicidade do material foi avaliado através da determinação de resistência a compressão simples de argamassa, de acordo com a NBR-7215 (ABNT, 1996). Para a execução dos ensaios foram executadas duas argamassas denominadas “A” e “B”. A argamassa de referencia “A” foi composta pelos materiais, cimento Portland CII-F-32, areia normal e água, e a argamassa “B” composta de cimento Portland CII-F-32, areia normal, água e 25 % em massa de cinza volante, em substituição em mesmo percentual de cimento Portland.

As quantidades necessárias de material para a dosagem das argamassas são estabelecidos pela NBR-5752 (ABNT, 2014) e encontram-se descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Quantidade de material em massa de acordo com o estabelecido pela NBR-5752 (ABNT, 2014).

Materiais	Argamassa A	Argamassa B
	Massa (g)	
Cimento CII-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Cinza Volante	-	156±0,2
Areia Normal	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo Superplastificante	-	Dispensável

Fonte: Elaborado pelo autor

A consistência fixa foi verificada através do ensaio da mesa de consistência (*flow table*), de acordo com o prescrito nas NBR-7215 (ABNT, 1996). As etapas de preenchimento do molde com argamassa foram executadas através de três camadas de mesma altura, onde cada uma das camadas recebeu 15, 10 e 5 golpes (i), posteriormente a finalização do preenchimento (ii) o material que ultrapassou a borda superior do molde foi retirado e o topo foi alisado com régua metálica. Conforme é possível visualizar na Figura 9.

Figura 9 - i) golpes na segunda camada ii) retirada do excesso de argamassa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a retirada do molde a argamassa foi submetida a queda da mesa em 30 repetições, no período de 30 segundos, o que provocou o abatimento de tronco de cone (iii). O índice de

consistência das argamassas foi calculado através da média aritmética das medidas dos dois diâmetros ortogonais, que não devem ultrapassar 5 mm. Na Figura 10 são demonstradas as argamassas “A” e “B” após a execução do abatimento de tronco.

Figura 10 – Abatimento de tronco das argamassas “A” e “B”(iii).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da quantidade de disponibilidade dos corpos de prova disponíveis no LATEC, as argamassas “A” e “B”, foram executadas em duas etapas, ficando divididas em:

- Etapa 1: Foram moldados os corpos de prova das argamassas “A” e “B” para rompimento nas idades: 3 e 7 dias, para cada idade foram moldados quatro corpos de prova, totalizando uma quantidade de 16 corpos de provas.
- Etapa 2: Foram moldados os corpos de prova das argamassas “A” e “B” para rompimento nas idades: 28 e 63 dias, para cada idade foram moldados quatro corpos de prova, totalizando uma quantidade de 16 corpos de provas.

Os corpos de prova para ensaio de compressão simples foram moldados com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os moldes foram preenchidos com a ajuda de uma espátula, em quatro camadas de igual altura, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com soquete normal, de acordo com o prescrito na NBR-7215 (ABNT, 1996), a Figura 11 demonstra o momento em que estavam sendo executados os golpes da última camada de preenchimento do molde (iv), e os corpos de prova devidamente identificados nos moldes antes de serem colocados na câmara úmida (v).

Figura 11 – execução dos golpes na ultima camada (iv) e finalização do preenchimento (v)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos permaneceram nos moldes, em câmara úmida até a idade de 24 horas, após este período os corpos de prova foram submersos em um tanque de água onde permaneceram até atingir a cura necessária, de acordo com a idade de rompimento. Após atingir a cura, de cada idade proposta, os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. A resistência à compressão simples foi fornecida pelo Equipamento EMIC SSH300, através do programa Tesc versão 4.0. Que baseia-se no princípio de cálculo fornecido pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \div 1.000.000 \text{ onde,} \quad (7)$$

σ = Resistência a compressão, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

A = área da seção do corpo de prova, em m²;

Posteriormente a obtenção da resistência à compressão dos quatro corpos-de-prova moldados, de cada idade proposta, foi calculada a média da resistência compressão, o resultado foi arredondado para o décimo mais próximo. O desvio relativo máximo foi calculado através da divisão do valor das diferenças entre a resistência média e a resistência individual obtida mais

distante da média, e o resultado foi multiplicado por 100, a porcentagem resultante foi arredondada para o decimal mais próximo, conforme prescrito na NBR-7216 (ABNT, 1987). Após o desenvolvimento destas etapas foi avaliado o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com a fórmula disposta a seguir, disponível na NBR-5752 (ABNT, 2014):

$$I_{cemento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \text{ onde,} \quad (8)$$

$I_{cemento}$ = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em %;

f_{cB} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da Argamassa B, em MPa;

f_{cA} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da Argamassa A, em MPa;

Após a obtenção da resistência das argamassas nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, foi verificado o percentual do índice de atividade pozolânica com cimento para cada idade, afim de analisar como foi o desenvolvimento do potencial pozolânico. E as exigências mínimas do índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, de acordo com a NBR-5752 (ABNT, 2014) conforme a proposta principal deste trabalho.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O presente capítulo traz os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades físico-mineralógicas da cinza volante quanto a:

- a) análise mineralógica;
- b) análise granulométrica;
- c) análise da massa específica;
- d) análise da superfície específica;

E o resultados alcançados no ensaio de resistência a compressão simples de argamassa, para obtenção do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Todos os resultados dos ensaios serão interpretados, analisados e comparados com estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), e referenciais bibliográficos.

4.1 Análise Mineralógica

A realização da técnica de difração de raios X – DRX da cinza volante permitiu a caracterização mineralógica da amostra, e a visualização de um halo amorfo. Os resultados do ensaio foram executados através do uso do Software X’Pert HighScore, e a caracterização dos compostos foi feita através da comparação dos resultados obtidos com o disponível nas bibliografias consultadas. A Tabela 12 trás os principais compostos identificados na amostra.

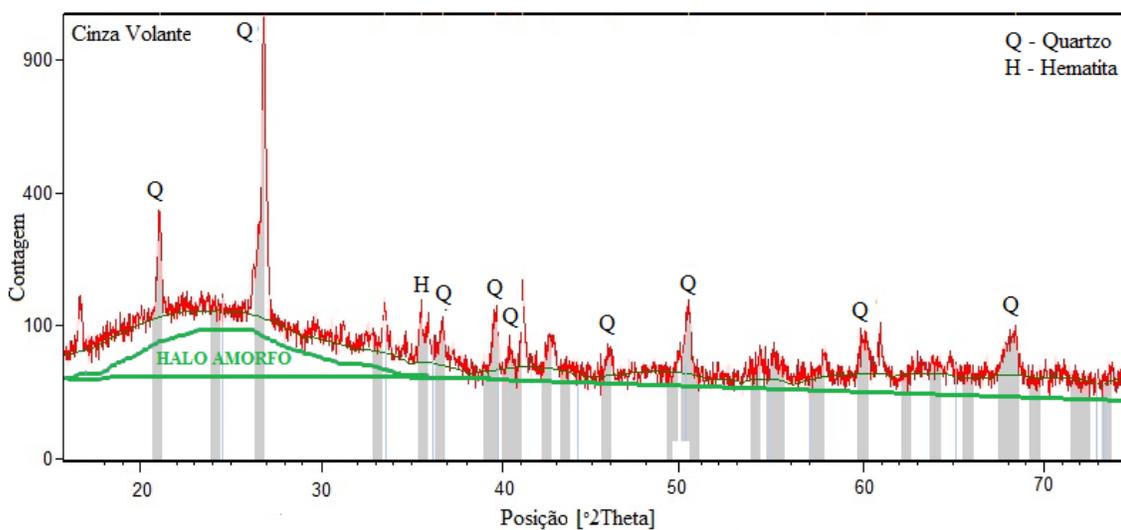
Tabela 12 - Compostos presentes na amostra.

Código de referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
00-046-1045	Óxido de Silício	SiO ₂	Quartzo
00-024-0072	Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	Hematita

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 apresenta os picos em que os compostos cristalinos Quartzo e Hematita estão presentes, entre os dezesseis picos apresentados, é possível visualizar que a grande maioria dos picos é de Quartzo. O halo amorfo representa que há quantidade de elementos reativos, o que é importante em argamassas e cimentos, uma vez que o composto de cinza volante deve reagir com o cimento (CORDEIRO, 2009).

Figura 12 - Difratoograma com os picos e halo amorfo.



Fonte: Fornecido pelo Software X'Pert HighScore

4.2 Análise Granulométrica

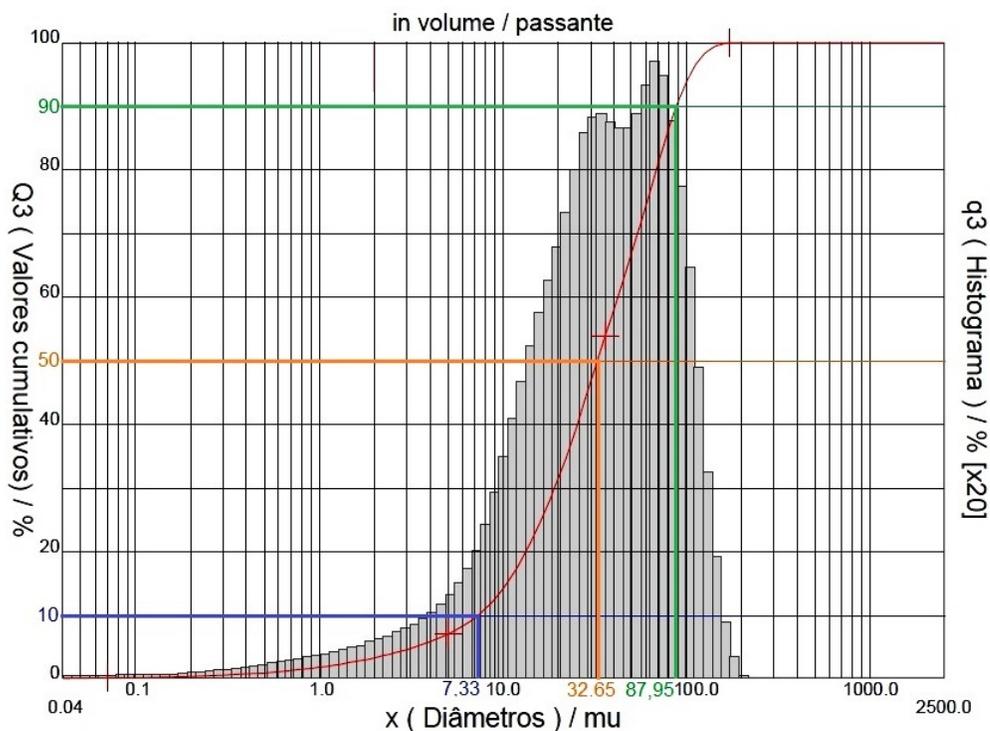
A análise granulométrica possibilitou o conhecimento da dimensão das partículas da amostra de cinza volante, sendo que o diâmetro médio do grão é de 41,35 µm. Os resultados foram fornecidos nos percentuais de 10%, 50% e 90%, e estão representados na Tabela 12.

Tabela 13 – Dados granulométricos

AMOSTRA	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
Cinza Volante	7,33 µm	32,65 µm	87,95 µm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Distribuição Granulométrica.



Fonte: Laudo de distribuição granulométrica.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), estudos mostram que uma cinza volante típica possui diâmetro de partícula variando entre $< 1 \mu\text{m}$ até perto de $100 \mu\text{m}$, portanto a granulometria analisada neste trabalho em muito se assemelha a estas características.

A Gráfico 4 exibe a distribuição granulométrica da cinza volante, e através da análise do comportamento da curva do gráfico pode-se observar que o diâmetro das partículas possuem granulometria diversificada, pois a inclinação da curva é acentuada, havendo predominância de diâmetro variando entre $10 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$.

Isaia (2007) atribui às partículas de cinza volante, menores que $10 \mu\text{m}$, influencia no aumento da resistência mecânica até os 28 dias de idade, e as partículas com diâmetro de $10 \mu\text{m}$ a $45 \mu\text{m}$, ganho de resistência mecânica nas idades superiores aos 28 dias, enquanto nas acima de $45 \mu\text{m}$, nenhuma influencia no ganho de resistência.

Através da análise do Gráfico 4 tem-se que 62,6% da amostra de cinza volante possui granulometria inferior a 45 μm , enquanto 87,5 % do Cimento Portland CII-F-32 utilizado possui partículas com diâmetro inferior a 45 μm , assim a cinza volante possui granulometria superior a do Cimento Portland. Mehta e Monteiro (2008) atribuem as partículas com diâmetro superior a 45 μm hidratação lenta e as com diâmetro superior a 75 μm ausência de hidratação completa. Tais características influenciam diretamente na resistência de argamassas, pois tornam o tempo de pega (solidificação) e o endurecimento mais lentos, diminuindo a resistência em curto prazo e a aumentando em longo prazo.

A NBR-12653 (ABNT, 2014) estabelece um percentual máximo de material retido na peneira 45 μm para o material ser considerado pozolânico, e a Tabela 14 traz uma comparação entre o resultado obtido e o parâmetro físico estabelecido.

Tabela 14 - Comparação entre as propriedades granulométricas.

Exigências Físicas		
NBR-12653	34,0	(* % máx. estabelecido)
Ensaio com cinza volante	37,4	(% atingido)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A cinza volante utilizada nos experimentos deste trabalho apresenta percentual de material retido na peneira 45 μm superior ao percentual máximo estabelecido pela NBR-12653 (2014), não estando em conformidade com os parâmetros estabelecidos para ser considerada pozolânica. Do ponto de vista de Mehta e Monteiro (2008), a granulometria e a superfície específica são as principais características a serem observadas em adições minerais, pois suas características é que determinam o efeito pozolânico no comportamento em concretos e argamassas, e não a composição química ou origem do material.

4.3 Análise da massa específica

A análise da massa específica foi feita através da utilização do Frasco Volumétrico de Le Chatelier, e foi definida através da média resultante da repetição dos ensaios consecutivos, onde se obteve o valor de 1,85 g/cm^3 . Portanto a cinza volante possui menor massa específica

que o cimento, o que na sua substituição em massa por cimento, atribui maior volume de cinza volante, uma vez que possui menos massa por centímetro cúbico.

4.4 Superfície específica

O método de BET possibilitou o conhecimento da superfície específica da cinza volante, o valor encontrado foi de 2,87 m²/g. Quando comparado ao encontrado na literatura, o valor obtido no ensaio muito se assemelha a margem de variação estabelecida por estas. A Tabela 15 trás a margem de resultados de superfície específica disponíveis na literatura.

Tabela 15 - Superfície específica da cinza volante.

Autor (ANO)	Superfície Específica (m ² /g)
ISAIA (2007)	2,0 – 7,0
MEHTA E MONTEIRO (2008)	2,0 – 4,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A finura da cinza volante influencia na atividade pozolânica, por isso é considerada uma característica importante a ser conhecida, uma vez que quanto mais fina mais rapidamente reage com o cimento (ISAIA, 2007) o que, portanto exerce influencia na velocidade de desenvolvimento de resistência da argamassa endurecida (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

4.5 Avaliação da Pozolanicidade

A consistência fixa foi verificada através do ensaio da mesa de consistência (*flow table*), de acordo com o prescrito nas NBR-7215 (ABNT, 1996). Os resultados para o abatimento de tronco das argamassas “A” e “B”, foram de:

- Argamassa A: 22,1 e 22 cm na durante a execução da primeira argamassa executada e 22,2 e 22,3 cm na segunda argamassa.

- Argamassa B: 26,3 e 25,8 cm na durante a execução da primeira argamassa executada e 24,5 e 24,3 cm na segunda argamassa.

Os resultados obtidos geraram a possibilidade de dispensar a utilização de aditivo superplastificante, uma vez que o índice de consistência da argamassa B foi superior a 10 mm, quando comparado ao índice de consistência da argamassa A.

Através do ensaio de resistência a compressão simples foi possível obter a resistência das argamassas para cada idade, sendo a argamassa “A” sem substituição e argamassa “B”, com 25% de substituição em massa de cimento por cinza volante. Os resultados estão especificados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas A e B.

Idade (dias)	Corpo de Prova	Argamassa A Resistência a Compressão (MPa)	Argamassa B Resistência a Compressão (MPa)
3	CP1	13,3	7,3*
	CP2	13,0	8,4
	CP3	13,2	8,3
	CP4	12,9	8,1
	Resistência Média	13,1	8,3
7	CP1	18,8	10,7
	CP2	17,9*	10,3
	CP3	20,0	10,7
	CP4	21,4	10,6
	Resistência Média	20,1	10,6
28	CP1	29,4	20,4
	CP2	27,7	20,3
	CP3	29,2	19,9
	CP4	27,1	18,9
	Resistência Média	28,3	19,9
63	CP1	30,4	25,8
	CP2	32,1	27,7
	CP3	32,7	25,9
	CP4	33,2	27,8
	Resistência Média	32,1	26,8

*Resistências com desvio relativo máximo superior a 6%, foram desconsideradas na resistência média.

Fonte: Elaborado pelo autor

O desenvolvimento da etapa de resistência à compressão simples possibilitou avaliar o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com a fórmula disposta na NBR-5752 (ABNT, 2014).

$$I_{\text{cimento}} = \frac{19,89}{28,33} \cdot 100 = 70,3\% \quad (8)$$

A Tabela 17 traz uma comparação entre o resultado obtido nos ensaios com a cinza volante e o parâmetro mínimo estabelecido pela NBR-12653 (ABNT, 2014).

Tabela 17 - Comparação entre o índice mínimo e o índice obtido nos ensaios.

Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.	
NBR-12653 (% mínimo estabelecido)	75,0
Argamassa com cinza volante (% atingido)	70,2

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o proposto pela NBR-5752 (ABNT, 2014), a amostra de cinza volante analisada no período da pesquisa, proveniente da Termelétrica de Candiota/RS, não atingiu o índice mínimo de 75% de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, conforme observado na Tabela 17, o que não caracteriza a amostra de cinza como material pozolânico.

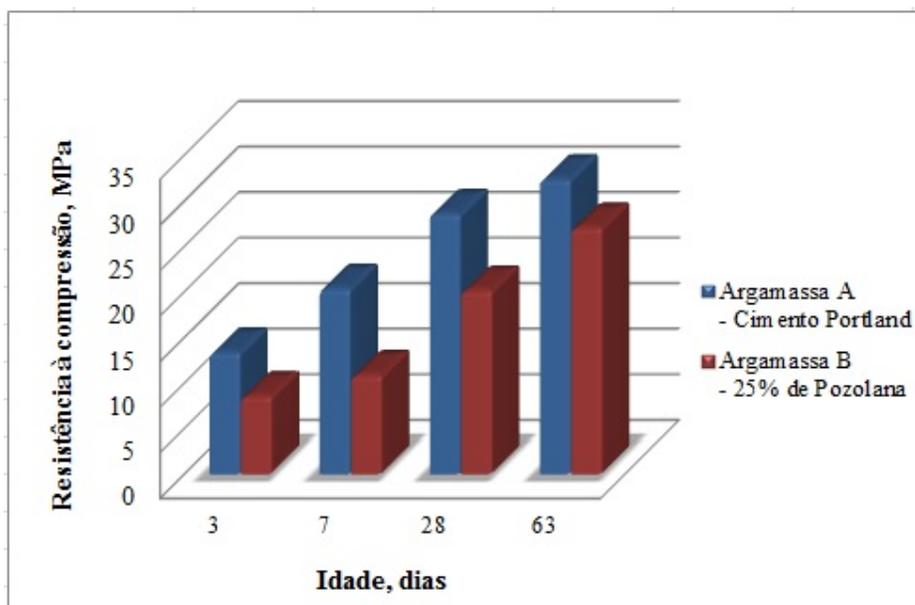
Mas embora a resistência mínima para 28 dias não tenha sido atingida, é possível verificar que o índice de atividade pozolânica da cinza volante aos 63 dias chega a 83,5 %, o que confirma o proposto na literatura. A Tabela 18, trás os valores médios de resistência da Argamassa A e B, e o índice de atividade pozolânica para cada idade.

Tabela 18 - Índice de desempenho com cimento para cada idade.

Idade (dias)	Argamassa A Resistência a Compressão (MPa)	Argamassa B Resistência a Compressão (MPa)	Índice de desempenho com cimento (%)
3	13,1	8,3	63,4
7	20,1	10,6	52,7
28	28,3	19,9	70,3
63	32,1	26,8	83,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 - Efeito do ganho de resistência.



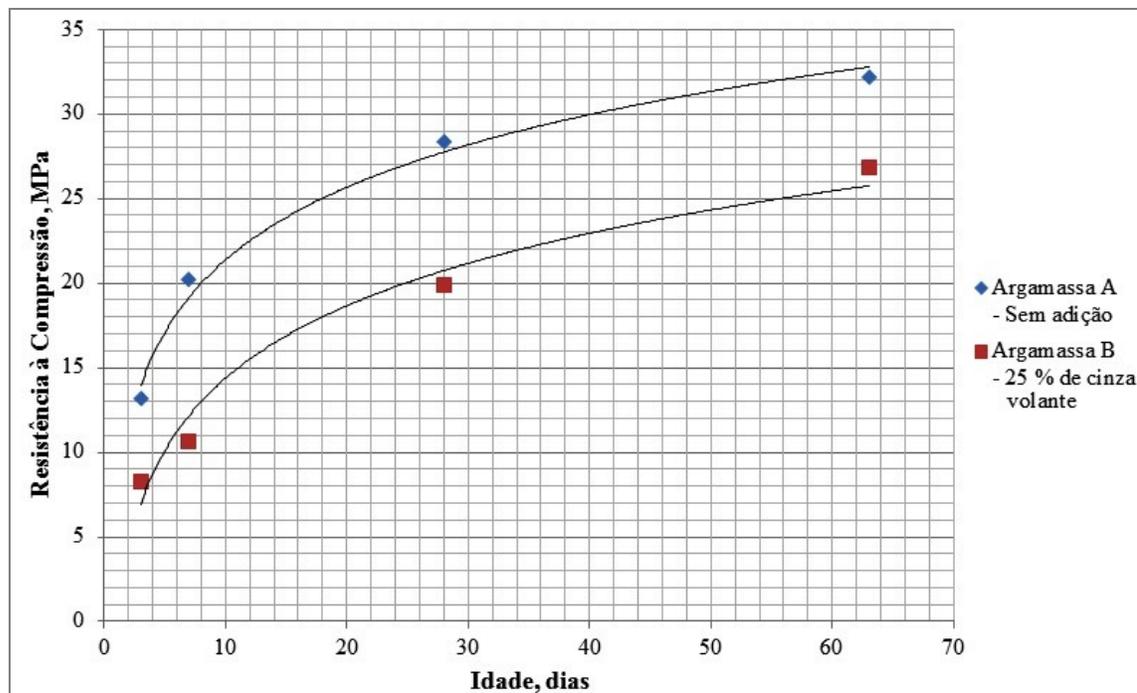
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cimentos com cinza volante em percentuais de substituição contendo 10, 20 e 30% desenvolvem resistência um pouco mais lentamente do que cimentos de referência, tendendo em grandes períodos a atingir resistência final superior aos cimentos sem adições.

O Gráfico 5 demonstra essa tendência de ganho da resistência em idades superiores, uma vez que em 63 dias o índice de desempenho com cimento Portland aumentou chegando a 83,5%, o que justifica o acima proposto por Mehta e Monteiro (2008). Pois a diferença entre os valores das resistências das argamassas estão se tornando menores, o que se pressupõe que no decorrer do aumento da idade o valor de resistência a compressão da argamassa B se torne muito próximo, igual ou superior a argamassa A.

O desenvolvimento do ganho de resistência estão representados no Gráfico 6, através das curvas de comportamento das argamassas A e B.

Gráfico 6 - Curva de crescimento da resistência das argamassas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando o Gráfico 6, com o apresentado na literatura por Mehta e Monteiro (2008), Gráfico 2 “ii” apresentado na revisão bibliográfica, é possível observar através da disposição das curvas que ambas apresentam comportamento semelhante, o que atribui confiabilidade aos resultados executados neste específico trabalho.

5 CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados dos ensaios realizados neste trabalho, pode-se constatar que a amostra de cinza volante não atingiu o índice de atividade pozolânica mínimo e o parâmetro físico de granulometria proposto pela NBR-12653 (ABNT, 2014). Embora estes parâmetros não tenham sido atingidos, observou-se que a amostra de cinza volante apresenta composição mineralógica, massa específica e superfície específica dentro dos parâmetros descritos por bibliografias pertinentes ao tema, que atestam o emprego da cinza volante como material pozolânico.

Durante o desenvolvimento deste estudo, pode-se atribuir que a argamassa B, composta por 25% de cinza volante, não atingiu 75 % da resistência da argamassa de referência, já que a maior parte das partículas da cinza volante apresentavam granulometria entre 10 μm a 45 μm , o que de acordo com Isaia (2007) confere ganho de resistência somente nas idades superiores a 28 dias. O que de fato ocorreu com a argamassa B, pois seu índice de atividade pozolânica aos 63 dias de idade foi aumentado a 83,5%. Este fato manifesta uma tendência no ganho de resistência em idades superiores, o que é uma característica de materiais com potencial pozolânico, uma vez que a curva de crescimento da resistência esta compatível com o disponível na literatura.

Portanto durante o desenvolvimento trabalho pode-se constar que embora o índice de atividade pozolânica da cinza volante não tenha sido satisfatório em menores idades, sua utilização como material de substituição parcial de cimento ainda pode ser considerada uma alternativa viável para desacentuar a problemática ambiental. Mehta e Monteiro (2008) atribuem a este ganho lento de resistência a importância técnica de reduzir as taxas de liberação de calor e a eficiência de preencher espaços capilares. Essas características garantem

às matrizes cimentícias, com adição pozolânica, ganho de resistência superior a argamassas/concretos sem adições, redução da incidência de trincas e fissuras, devido a menores picos de calor de hidratação, e aumento da impermeabilidade com preenchimento dos poros ao longo do tempo pelas reações tardias das pozolanas, o que torna seu uso favorável em obras com estruturas de grande porte e de retenção de fluidos, como por exemplo: barragens, grandes blocos de fundações e tanques.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Relatório ANEEL 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. - Brasília: ANEEL, 2013. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_Aneel_2012.pdf> Acesso em: 11 out. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP): **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, Boletim Técnico BT-106, 2002, 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7214:** Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7216:** Amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-9831:** Cimento portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-12989:** Cimento Portland branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-13116:** Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM-23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

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

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história sobre cimento Portland**, disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland#.VBonpvldUII>> , acesso em: 17 de Ago. 2014.

BAUER, R. J. B. **Falhas em revestimento**. Anais do Encontro Argamassas Industrializadas – Usos e Desempenho. São Paulo, 1993.

BAUER, L. A. Falcao. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BROWN, M. T. **Caracterização Petrológica e Química dos Carvões utilizados em Usinas Termelétricas Brasileiras e as Cinzas Geradas no processo de Combustão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CANON, R. W. **Proportioning fly ash concrete mixes for strength and economy**. ACI Journal Preceedings, Detroit, v.65, n. 11, p. 969-979, Nov. 1968.

CARVALHO, M. B. M. **Impactos e Conflitos da Produção de Cimento no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://bdtd.bce.unb.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2916>. Acesso em: 11 set. 2014.

CASSAL, S. B., **Durabilidade de concretos com adição de cinza de casca de arroz frente ao ataque por ácidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CORDEIRO, L. N. C. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CRUZ, O. C. **Desempenho de um hidrociclone de geometria “rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação**. 2008. Dissertação (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP , São Paulo, 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Mineraias para Concreto Estrutural**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. São Paulo: IBRACON, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011.

DANNA, J. D., **Manual de Mineralogia**. Livros técnicos e científicos. Editora S.A., 1983.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. São Paulo, 2008.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CIMENTO (IBC): **Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília, Confederação Nacional da Indústria CNI, 2012, 58 p.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado**. PEF 5707 – Concepção, Projeto e realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo, 1998.

KIHARA, Y. **Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil**. *Cerâmica*, 28 (145), 15, 1982.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade**. São Paulo, 1983. 223 p.

KIHARA, Y. **O estudo das cinzas volantes brasileiras**. *Cerâmica*, 32 (193), 1986.

KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. Porto Alegre, 1996.

MALQUORI, G. **Portland-Pozzolan Cement**. In: International symposium on the chemistry of cement, 4, Washington, D. C, Paper VIII-3, 1960.

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

MEHTA, P. Kumar; **Natural Pozzolan**. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 1923. Tradução Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1982.

OLIVEIRA, A. N. **Estudo da substituição parcial do cimento portland por resíduo de cerâmica vermelha**. Monografia (Graduação Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC): **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2013, 38 p. Disponível em: < http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp>. Acesso em: 11 set. 2014.

PRISZKULNIK, S. **Pozolanas para aglomerantes de construção civil**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

SAINT-EXUPÉRY, Antonie. **O Pequeno Príncipe**. Literatura infanto-juvenil. França, 1943.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006, 164. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13ª Edição, São Paulo: Globo, 1998.

POZZOBON, C. E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico de Jorge Lacerda**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil. Aspectos Técnicos e Ambientais**. V.I., CIENTEC, Porto Alegre, 2006.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2a edição revisada e ampliada, v. 1, p 113; v, 2, p 468-505; Editora Edigar Blucher, 1989.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado). Autarquia Associada a Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, N. I. W.; CHIES, F.; ZWONOK, O. **Uso de cinzas de carvão na construção civil**. I encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis, Anais. Canela – RS, p. 15-20, 1997.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico**. Cerâmica, Vol.45, nº 296, 1999.

ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 1989.