UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES E ESTRUTURAS

ALLEN GABRIEL PEREIRA NOGUEIRA

UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES COMO AGLOMERANTE NA CONFECÇÃO DE BLOQUETES, MEIOS-FIOS E BANCOS DE CONCRETO

São Luís
2017

ALLEN GABRIEL PEREIRA NOGUEIRA

UTILIZAÇÃO DAS CINZAS VOLANTES COMO AGLOMERANTE NA CONFECÇÃO DE BLOQUETES, MEIOS-FIOS E BANCOS DE CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros de Aguiar

São Luís

2017

Nogueira, Allen Gabriel Pereira.
Utilização de cinzas volantes como aglomerante na confecção de bloquetes, meios-fios e bancos de concreto / Allen Gabriel Pereira Nogueira.– São Luís, 2017.
77 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros de Aguiar.

1. Cinza volante. 2. Carvão mineral. 3. Concreto. I. Título.

CDU 624.012.4:622.33

ALLEN GABRIEL PEREIRA NOGUEIRA

UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES COMO AGLOMERANTE NA CONFECÇÃO BLOQUETES, MEIOS-FIOS E BANCOS DE CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 26 / 06 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros de Aguiar (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

_____

Prof. Esp. Clayton Carvalhedo Silva
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

_____

Profª. Dr. Iêdo Alves de Souza
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, O Todo Poderoso, que sempre esteve comigo nessa jornada e nunca me desamparou em momento algum. Aos meus pais pelo apoio, carinho, palavras de incentivo, confiança que sempre estarão presentes em minha vida.

À minha estimada avó, que sempre acreditou em mim, me auxiliou e cuidou de mim em todos os momentos da vida.

Aos meus amigos, que me incentivaram, me apoiaram e sobretudo me ajudaram no meu crescimento pessoal, intelectual e profissional, em especial à Wellington Jorge Cutrim pelo carinho e constante incentivo.

À Teresa Helena Barros, pelo incentivo e contribuição neste trabalho. Sua conduta profissional e intelectual serve como molde para o meu futuro e inspiração de vida.

Aos mestres Clebson Candido e Ana Paula Pereira, do Instituto Militar de Engenharia, que se propuseram a me ajudar e a enriquecer este trabalho.

Aos laboratoristas e amigos, Filipe e Jurandir, do Laboratório de Concreto da Universidade Estadual do Maranhão. Sem a ajuda e apoio de vocês, esse trabalho seria impossível de se realizar.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram na elaboração desta monografia, pois sem eles alcançar meu objetivo seria uma tarefa muito mais penosa e árdua, e em especial ao professor doutor, orientador e amigo Eduardo Aurélio Barros de Aguiar. Pela amizade, orientação e pelas palavras que um dia saíram de sua boca, que mudaram e transformaram meu futuro acadêmico e profissional.

Há, porém, ainda muitas outras pessoas a agradecer. Se todas elas fossem citadas aqui, creio eu que nem ao término deste trabalho caberiam as palavras que seriam escritas.

"Ninguém te poderá resistir todos os dias da tua vida; como fui com Moisés, assim serei contigo; não te deixarei, nem te desampararei."

Josué 1. 5

RESUMO

A queima do carvão mineral gera as cinzas volantes que são encontradas nas paredes das chaminés de usinas termelétricas. Este material é estabilizado com calcário e lançado no meio ambiente. O grande potencial de utilização das cinzas minerais, a sua grande disponibilidade, e o seu potencial risco ambiental associado à sua disposição, justificam um excelente tema a ser abordado. Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do concreto confeccionado com substituição parcial do cimento pelas cinzas volantes provenientes das termelétricas movidas a carvão mineral. Para tal análise será feito o ensaio de resistência a compressão do concreto feito em laboratório com o rompimento de corpos de prova, descrito pela NBR 5739/1994, afim de utilizar os resultados para confeccionar bloquetes, meios-fios e bancos de concreto para utilização no Campus Paulo VI – UEMA afim de medir seu desempenho quando expostos à agentes externos.

Palavras-chave: Concreto. Cinzas Volantes. Carvão Mineral.

ABSTRACT

The burning of the coal generates the fly ash that is found in the walls of the chimneys of thermoelectric plants. This material is stabilized with limestone and released into the environment. The great potential of use of the mineral ash, its great availability, and its potential environmental risk associated to its disposal, justify an excellent subject to be approached. This work aims to analyze the performance of concrete made with partial replacement of cement by fly ash from thermoelectric plants moved to coal. For this analysis, the compressive strength test of the concrete made in the laboratory with the rupture of test specimens, described by NBR 5739/1994, will be done in order to use the results to make blocks, wire rods and concrete benches for use in the Campus Paulo VI - UEMA in order to measure its performance when exposed to external agents.
Keywords: Concrete. Fly Ash. Mineral Coal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Meio final de consumo em 2013..... 16
Figura 2 - Fontes de geração de energia..... 17
Figura 3 - Complexo eólico Chapa do Piauí..... 21
Figura 4 - Usinas de ondas no Porto do Pecém..... 21
Figura 5 - Usina termelétrica de Campina Grande..... 22
Figura 6 - Usina termelétrica ENEVA em São Luís..... 23
Figura 7 - Base sendo construída no trecho de acesso ao porto de Santa Clara..... 29
Figura 8 - Pátio de estacionamento com base de cinzas no município de Candiota – RS..... 30
Figura 9 - Tijolo de cinza curado em autoclave..... 31
Figura 10 - Construção de alvenaria utilizando argamassa e tijolos com cinzas..... 31
Figura 11 - Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland..... 33
Figura 12 - Etapas do processo de hidratação do cimento..... 38
Figura 13 - Zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento..... 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de eletricidade na rede 18
Tabela 2 – Fontes renováveis 18
Tabela 3 - Percentagem de uso das cinzas por continente..... 26
Tabela 4 – Proporção de óxidos no cimento..... 34
Tabela 5 – Constituintes principais do cimento Portland.....35
Tabela 6 – Formulações e porcentagens de adição de concretos.....51
Tabela 7 – Formulações e porcentagens de substituição de concretos.....51
Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova para a formulação de adição.....52
Tabela 9 – Quantidade de corpos de prova para a formulação de substituição.....53
Tabela 10 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....56
Tabela 11 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo..... 56
Gráfico 2 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo 57
Gráfico 3 – Resistencia média a compressão aos 7 dias..... 59
Gráfico 4 – Resistencia média a compressão aos 14 dias..... 59
Gráfico 5 – Resistencia média a compressão aos 7 dias.....60
Gráfico 6 – Resistencia média a compressão aos 14 dias.....60

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 – Aterro de cinzas no município de Rosário 27
Foto 2 – Aterro de cinzas no município de Rosário 28
Foto 3 – Ensaio de agregado graúdo no laboratório da UEMA 47
Foto 4 – Cápsulas na estufa para determinação de teores de umidade..... 48
Foto 5 – Ensaio de peso específico dos aglomerantes.....50
Foto 6 – Preparação do concreto.....52

Foto 7 – Corpos de prova moldados.....53

Foto 8 – Cura dos corpos de prova.....54

Foto 9 – Ensaio de compressão axial.....55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Percentual
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFt	Etringita ou Trissulfoaluminato de cálcio hidratado
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
$C_3S_2H_3$	Silicato de cálcio hidratado
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio ou $Ca(OH)_2$ ou portlandita
Cl^-	Ânion de cloreto
CO_2	Anidrido carbônico
CCP	Caminho condutivo continuo
CP IV	Cimento portland pozolânico
DCP	Caminho descontinuo
DDP	Diferença de potencial
Fe	Ferro
Fe^{3+}	Cátion de ferro III ou férrico

Fe_2O_3	Óxido de ferro III ou oxido férrico
$FeCl_3$	Cloreto férrico
$Fe(OH)_2$	Hidróxido ferroso
$Fe(OH)_3$	Hidróxido férrico
fc	Resistência à compressão axial
H_2O	Água
H_3PO_4	Ácido fosfórico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
ICP	Caminho isolante
ITZ	Zona de transição interfacial
K^+	Íon potássio
K_2O	Óxido de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
Mg	Magnésio
Mg^{2+}	Íon de magnésio
MgO	Óxido de magnésio ou periclásio
Mn_2	Cátion de manganês ou manganês II ou manganoso
MPa	Mega Pascal
Na^+	Íon sódio
Na_2O	Óxido de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
OH^-	Íon hidroxila
pH	Potencial de hidrogênio
S	Enxofre
SiO_2	Quartzo ou óxido de silício ou dióxido de silício
SO_2	Dióxido de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....14

2 REFERENCIAL TEÓRICO.....16

2.1 Matriz energética brasileira.....16

2.2 Adoção de novas tecnologias.....19

2.3 Panorama mundial dos resíduos da combustão do carvão nas usinas termelétricas.....24

2.4 Origem e Classificação das cinzas de carvão mineral.....26

2.5 Uso das cinzas na engenharia civil.....29

2.5.1 Construção.....29

2.5.2 Fabricação.....30

2.5.3 Estabilização de resíduos.....32

2.6 Cimento.....32

2.6.1 Hidratação do cimento.....36

2.7 Concreto de cimento Portland.....39

2.7.1 Agregados.....40

2.7.2 Água.....41

2.7.3 Microestrutura do concreto com cimento Portland.....42

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....44

3.1 Seleção dos materiais.....45

3.1.1 AGREGADOS.....45

3.1.1.1 Massa específica e massa específica aparente.....45

3.1.1.2 Umidade do agregado miúdo.....47

3.1.1.3 Composição granulométrica.....48

3.1.2 AGLOMERANTES.....48

3.1.2.1 Peso específico.....49

3.2 Dosagem.....50

3.3 Preparação do concreto.....51

3.3.1 Moldagem dos corpos de prova.....51

3.3.2 Cura.....54

3.4 Caracterização dos concretos.....54

3.4.1 Resistencia a compressão.....54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....56
4.1 Caracterização das matérias-primas.....56
4.1.1 AGREGADOS.....56
4.1.1.1 Agregado graúdo.....56
4.1.1.2 Agregado miúdo.....57
4.1.2 AGLOMERANTES.....58
4.2 Resistencia a compressão.....58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....62
REFERENCIAS.....63
APENDICE A – COMPOSIÇÃO DAS CINZAS VOLANTES E PH.....68
APENDICE B – VALORES ABSOLUTOS DAS RESISTENCIAS A COMPRESSÃO AXIAL DA FORMULAÇÃO DE ADIÇÃO.....69
APENDICE C – TESTE DE TUKEY PARA FORMULAÇÕES DE ADIÇÃO AOS 7 DIAS.....71
APENDICE D – TESTE DE TUKEY PARA FORMULAÇÕES DE ADIÇÃO AOS 14 DIAS.....72
APENDICE E – TESTE DE NORMALIDADE PARA FORMULAÇÕES DE ADIÇÃO AOS 7 DIAS.....73
APENDICE F – TESTE DE NORMALIDADE PARA FORMULAÇÕES DE ADIÇÃO AOS 14 DIAS.....74
APENDICE G – TESTE DE TUKEY PARA FORMULAÇÕES DE SUBSTITUIÇÕES AOS 7 DIAS.....75
APENDICE H – TESTE DE TUKEY PARA FORMULAÇÕES DE SUBSTIUIÇÕES AOS 14 DIAS.....76

1 INTRODUÇÃO

As usinas termelétricas a base de carvão mineral pulverizado constitui hoje uma importante fonte de energia elétrica não hídrica e auxiliam a expansão industrial necessária do Brasil e o atendimento da grande e constante demanda dessa expansão. Durante a produção de energia elétrica pelas usinas termelétricas, a combustão do carvão pulverizado, acontece num intervalo de temperaturas elevadas entre 1200º C e 1600º C.

Isto acontece em um ambiente gasoso oxidante, com tempo de permanência das partículas nesse ambiente de 2 segundos, tempo esse suficiente para a fusão total ou parcial da matéria mineral. Como resultado da produção da energia elétrica são produzidas as cinzas pesadas e as cinzas volantes.

As cinzas volantes possuem uma textura mais fina e por serem mais leves, são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e captadas em precipitadores eletrostáticos e posteriormente são levadas aos setores de armazenamentos, sendo que uma quantidade considerável ainda é disposta em aterros ou a céu aberto. Entretanto, as cinzas pesadas possuem uma textura mais grosseira que caem no fundo da fornalha em tanques de resfriamento e posteriormente removidas por fluxo intenso de água.

A produção mundial de cinza a partir da combustão do carvão excede 550.106 toneladas/ano. Já no Brasil, estima-se que na geração de eletricidade, as usinas brasileiras produzem anualmente cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas. Deste total pouco menos de 30% dessas cinzas são utilizadas, principalmente pelo setor da construção civil e pelas indústrias cimenteiras. Por possuir atividade pozolânica e ser de origem silicosa e mineralogicamente amorfa e, ainda, possuir uma reatividade com a cal, as cinzas volantes atualmente têm na fabricação de cimento Portland a sua destinação mais comum, apesar do consumo ser ainda insuficiente para a utilização de todo o volume de cinza produzido.

As cinzas pesadas, que correspondem 25% da massa de cinza residual produzida, é incipiente e pouco disseminada. Assim, a busca de novos materiais que possam incorporar grandes volumes de cinza de carvão é de fundamental importância para dar uma destinação final e apropriada ao resíduo de cinza volante e cinza pesada, agregando valor ao mesmo e favorecendo o meio ambiente.

No desenvolvimento de concretos com desempenho superior aos convencionais, as adições de cinzas minerais em formulações de concretos,

principalmente as cinzas volantes oriundas do processo de geração de energia das termelétricas, tem despertado grande interesse pelo fato de que elas possuem uma grande quantidade de oferta e por possuírem uma granulometria muito fina, favorecendo a atividade pozolanica.

Entretanto, poucas pesquisas tem sido desenvolvidas utilizando-se as cinzas pesadas como material de adição ao concreto em substituição ao agregado miúdo e muito menos ainda pesquisas que utilizam as cinzas volantes em substituição ao cimento em formulações de concretos.

Nesse cenário, esse trabalho apresenta um estudo da adição e substituição de cinzas volantes oriundas da usina termelétrica ENEVA – São Luís em substituição ao cimento Portland, contribuindo para o estudo de concreto com propriedades melhoradas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, além de uma alternativa de aproveitamento de resíduos minerais que contribua para o desenvolvimento sustentável da tecnologia do concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Matriz energética brasileira

Considerar a cinza originada da combustão de carvão como um material de utilidade e como um bem material, em vez de lixo ou rejeito, é um pensamento comum, hoje no Brasil. A importância das cinzas cresce, na medida que políticas governamentais brasileiras, que vem sendo estudadas e adotadas para o setor energético, acenam para um cenário bem favorável para a instalação de novas matrizes energéticas, principalmente as unidades térmicas de carvão. [45]

> O surgimento do interesse na criação e instalação de novas formas de obtenção de energia vem sendo despertado, devido à crise de energia em que o país se encontra. O moderado investimento no setor, aliado ao aumento gradativo do consumo de energia elétrica – um apelo inerente dos tempos atuais – resultaram no estabelecimento da crise que afeta o país, já sob comando do governo federal. [41]

Todos os setores da sociedade brasileira vivem sob a meta da redução do consumo de energia elétrica, de cunho constante e obrigatório, sob uso de penalidades tais como cortes do fornecimento e multas. No Brasil, todo o controle do setor energético é feito pelo Ministério de Minas e Energia, criado em 1960, enquanto que o planejamento e monitoramento do setor é realizado pela Empresa de Pesquisa Energética. De acordo com as informações referentes a oferta e consumo de energia no Brasil, 17,1% da energia produzida no país em 2013, foi consumida em forma de eletricidade, exposto na figura 1. [45]

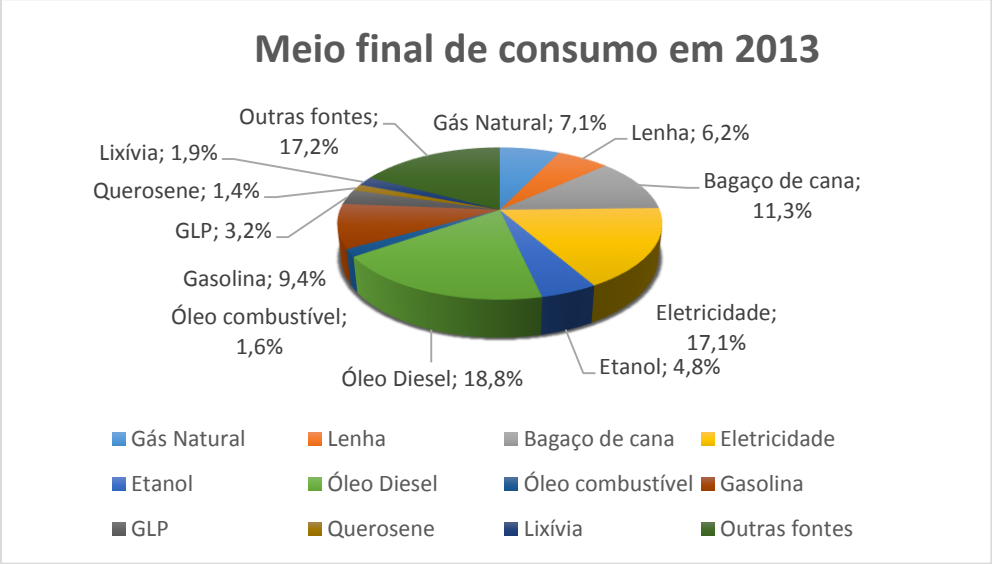


Figura 1 – Meio final de consumo em 2013. (Fonte: Ministério de Minas e Energia)

A figura 2 apresenta a composição das fontes dessa energia, ou seja, a matriz de geração energética brasileira. Atenção deve ser dada à fonte hidráulica, responsável por 70,6% da geração do país em 2013. Ainda de acordo como balanço energético nacional, essa atividade foi inferior à participação da fonte no ano de 2012, e a capacidade de geração hidráulica também foi menor em termos absolutos, com uma redução de 455,6 TWh em 2012 para 430,9 TWh em 2013. A participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, representadas em grande parte pela energia hidráulica, foi reduzida de 84,5% em 2013 para 79,3% em função de condições climáticas desfavoráveis, que levaram ao aumento substancial da geração térmica.

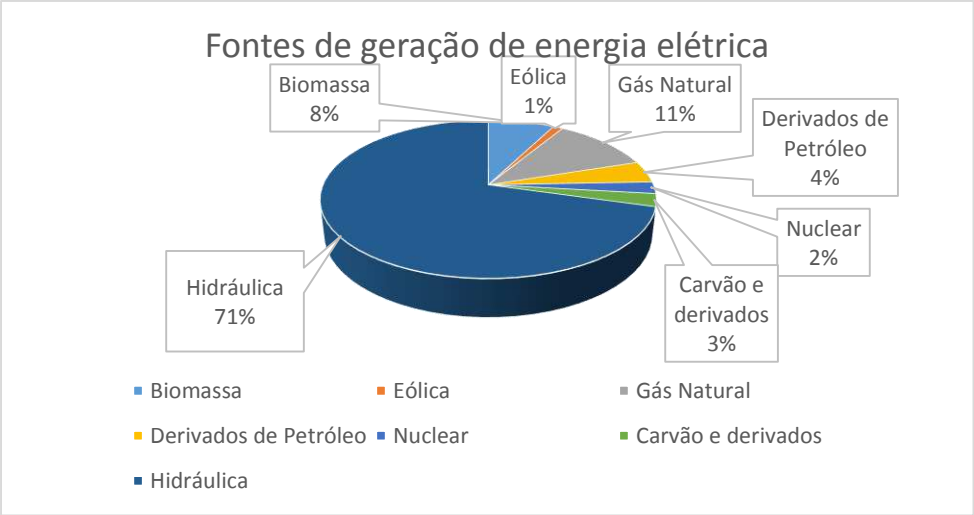


Figura 2 – Fontes de geração de energia elétrica em 2013. Fonte (Ministério de Minas e Energia 2013)

A crise no setor elétrico do Brasil se prolonga a alguns anos e as suas consequências devem permanecer por um longo período. O papel de um sistema energético na sociedade é de atender a sua necessidade de energia com um custo razoável que permita o acesso da camada menos favorecida e em harmonia com o meio ambiente. O surgimento da crise não foi por acaso e a causa não se resume a um só único item. [6]

Esse processo tem como referência histórica a redução de investimentos na transmissão, distribuição e conservação de energia elétrica, tais quais: a dependência do país com relação às usinas hidrelétricas, responsáveis pela produção de quase toda a totalidade da energia consumida no território brasileiro; as transformações ambientais, incluindo os baixíssimos índices pluviométricos que geraram impactos negativos na matriz energética; aumento da demanda em razão do desenvolvimento de novos

empreendimentos nos diferentes setores da economia, como agricultura, indústria e diversos serviços, associado a um aumento de consumo residencial de energia elétrica. [6]

Consumo de eletricidade na rede (GWh)					
Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2015	131.100	169.942	90.190	73.278	464.510
2016	133.768	165.814	92.144	74.806	466.532
2017	138.990	170.092	96.257	77.939	483.278
2018	144.877	175.762	100.914	81.398	502.951
2019	151.045	181.239	105.715	85.015	523.014
2020	158.278	192.119	111.621	89.111	551.129
Variação (% ao ano)					
2015-2020	3,8	2,5	4,4	4,0	3,5

Tabela 1 – Consumo de eletricidade na rede. (Fonte: Ministério de Minas e Energia 2015)

A principal peça da matriz energética brasileira é a fonte hidráulica. No que diz respeito à poluição, ela é considerada entre as fontes mais limpas, mas o seu grande impacto no meio ambiente é de grande magnitude, haja vista a necessidade do alagamento de grandes áreas e a interferência direta na fauna e na flora e deslocamento de comunidades. [6]

A tabela abaixo mostra um resumo das principais características das fontes geradoras de energia elétrica:

Fontes Renováveis		
Fontes	Vantagens	Desvantagens
Hidrelétrica	Energia limpa	Área para construção é enorme, afeta a fauna e a flora em função do alagamento de grandes áreas. Geralmente estão distantes do centro de carga.
Biomassa	Custo de aquisição relativamente baixo	Baixo poder calorífico
Eólica	Energia limpa	Alteração de paisagem e emissão de ruído
Solar	Energia limpa	Baixa eficiência das placas armazenadoras
Fontes não renováveis		
Fontes	Vantagens	Desvantagens

Termoelétrica a carvão mineral	Possibilidade de instalação próxima ao centro de carga reduzindo custos de transmissão	Poluição ambiental com emissão de gases e resíduos sólidos
Termoelétrica a óleo combustível	Possibilidade de instalação próxima ao centro de carga reduzindo custos de transmissão	Poluição ambiental com emissão de gases e resíduos sólidos
Termoelétrica a gás natural	Possibilidade de instalação próxima ao centro de carga reduzindo custos de transmissão	É das fontes não renováveis e que causa menos impacto no ambiente mas ainda há a emissão de gases na atmosfera

Tabela 2 – Fontes renováveis. (Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2013)

A opção pela utilização de cada fonte envolve uma numerosa série de variáveis, porém existe uma tendência mundial em aumentar o peso da questão ambiental nas decisões dos investimentos. Neste contexto, a utilização de fontes renováveis e com baixo impacto ambiental tem levado ao crescimento nos investimentos nas plantas geradoras de energia alternativa.

2.2 Adoção de novas tecnologias

Diante desse cenário, pensar na exploração de novos potenciais energéticos significa fazer investimentos em tecnologia para fontes cada vez mais eficazes e mais baratas, objetivando contemplar o potencial instalado existente (evitando sobrecarregar o sistema hidrelétrico) e projetando o aumento da demanda. [46]

A utilização de fontes renováveis de energia já uma realidade prática em inúmeros países do mundo seja pelo motivo da existência de investimentos para tal ou porque houve problemas com os métodos de geração tradicionais.

Como a geração de energia utiliza recursos naturais como insumos e pode gerar impactos sobre o meio ambiente, a melhora de condições de vida da geração atual sem o comprometimento dos recursos a serem disponibilizados para as gerações futuras exige a adoção de planos e estratégias sustentáveis no setor energético do Brasil. [6]

Atualmente existem novas tecnologias de geração de energia que favorecem o meio ambiente. Segundo a Bloomberg New Energy Finance, o Brasil deverá atrair investimentos até 2040 para projetos solares e eólicos. No total, o país irá adicionar 250

gigawatts de nova capacidade nos próximos anos, chegando a 383 GW, um aumento de 189% sem sua capacidade de total. Para isto, já estão sendo implantados novos recursos espalhados pelo território brasileiro. [41]

No contexto da região nordeste, percebe-se que a região possui os maiores e melhores índices de utilização de sistemas de geração de energia do Brasil, devido as suas condições climáticas e meteorológicas, localização próxima de grandes escoadores de materiais e logística, como porto do SUAPE, Pecém e Itaqui. A utilização das fontes eólica e solar poderia reduzir consideravelmente as diferenças econômicas com relação as outras regiões, se incentivada a geração distribuída entre os cidadãos para baixa e média potência.

Atualmente, novas matrizes foram implantadas na região nordeste para aproveitar este grande potencial energético que a região oferece. No estado do Piauí foram implantadas usinas eólicas na região, que fazem parte de um gigantesco complexo denominado "Complexo eólico Chapada do Piauí" localizado nas cidades de Simões, Marcolândia, Padre Marcos e Caldeirão Grande. A energia produzida nestes parques eólicos será conduzida para o Sistema Interligado Nacional (SIN) e, posteriormente será distribuída por todo país.

Outro grande exemplo é a usina de ondas instalada no porto do Pecém, no Ceará. Esta usina é a primeira da américa latina que utiliza o movimento das ondas do mar para produção de energia elétrica. Ela é composta por um sistema de alta pressão que movimentam as turbinas e acionam os geradores, um sistema totalmente brasileiro e que foi desenvolvido e patenteado pela COPPE- UFRJ.

Figura 3 – Complexo eólico chapada do Piauí. (Fonte: Repositório da Queiroz Galvão Energia)[1]

Figura 4 – Usinas de ondas no porto do Pecém. (Fonte: Repositório da COPPE – UFRJ)[2]

O incentivo para a produção em larga escala dos parques eólicos apresentaria uma solução interessante, analisando que na ocorrência de escassez de água para as usinas

[1] Disponível em: http://www.queirozgalvaoenergia.com/br/destaques/ler/bons-ventos-sopram-a-favor-do-piaui/MjQ2

[2] Disponível em: http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/a-coppe/coppe-produtos/usina-de-ondas

hidrelétricas, as termoelétricas seriam acionadas, provocando sérios danos ambientais e apresentando aumento no preço do quilowatt (kW), gerando matrizes complementares e não concorrentes entre si. [6]

Este caso exemplifica o fato do aumento da energia elétrica e a mudança da bandeira tarifária, agravada pela falta de incentivo do governo para as empresas brasileiras que as sufoca com seus impostos impiedosos e pela isenção de diversas empresas estrangeiras para a facilitação e inserção do mercado nacional.

As termelétricas que mais atuam na região nordeste são: a usina termelétrica de Campina Grande, que atua juntamente na companhia hidro elétrica do São Francisco; a usina do Vale do Açu Jesus Soares Pereira (Termoaçu), localizada em Alto dos Rodrigues no Rio Grande do Norte e a ENEVA, localizada em São Luís no Maranhão, em parceria com a Eletronorte.

Figura 5 – Usina termelétrica de Campina Grande. (Fonte: Repositório da Borborema Energética)[3]

[3] Disponível em: http://borboremaenergetica.com.br/

Figura 6 – Usina termelétrica ENEVA em São Luís. (Fonte: Repositório ENEVA – Itaqui)[4]

Por uma conjuntura de circunstancias, há um cenário favorável para o aproveitamento maior das usinas termelétricas para geração de energia, principalmente tendo em vista as tendências de encarecimento de energia hidrelétrica, a instabilidade no fornecimento do gás por parte de países estrangeiros, como Argentina e Bolívia, e a necessidade de se ter energia segura para todo o Brasil. [45]

As usinas térmicas a carvão podem cumprir um papel de dar segurança ao sistema elétrico, embora não se conteste a importância dessas usinas como fonte de desenvolvimento regional, os efeitos negativos, através da emissão de gases e especialmente de particulados, sobre o meio ambiente tornaram-se uma preocupação de toda a comunidade. [46]

[4] Disponível em: http://www.eneva.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/empreendimentos/ute-itaqui

2.3 Panorama mundial dos resíduos da combustão do carvão nas usinas termelétricas

No fim do século XIX, paralelo ao surgimento do cimento do tipo Portland, ao crescimento do uso da cal e pozolanas naturais, surgiam nos Estados Unidos da América e na Europa, materiais artificiais – cinzas – com notáveis propriedades tecnológicas. Estes novos materiais, provenientes da combustão de carvão fóssil revelaram de imediato muita afinidade com aglomerantes tipo cal. [65]

O carvão fóssil que passava a ser adotado como combustível foi inicialmente empregado na forma britada, mas somente por volta de 1910 teve as suas primeiras utilizações, em pequenas caldeiras, na forma pulverizada. Como consequência da presença de componentes inorgânicos passaram a ser gerados, durante a combustão, diferentes tipos de resíduos: escórias, cinzas de fundo e cinzas volantes. [65]

A valorização destes resíduos iniciou-se entre as décadas de 1920 e 1930 com a inserção de grandes caldeiras aquecidas à carvão pulverizado e com o desenvolvimento de tecnologias de queima adaptadas a carvões com alto índice de teor em matéria mineral. A baixa eficiência dos sistemas de retenção de cinzas da época, grande parte era carregada através das chaminés, com os gases da combustão para a atmosfera.

Com o objetivo de evitar que as usinas termelétricas se transformassem nos grandes poluidores da atmosfera, foram desenvolvidos eficientes processos de remoção de matéria mineral sólida dos gases de combustão. As grandes quantidades de cinzas, que passaram a ser estocadas nas usinas, começaram a criar sérios problemas de disposição. A valorização destes subprodutos tornou-se uma medida necessária e indispensável. [45]

A partir dos estudos e pesquisas que passaram a ser desenvolvidos com as cinzas, entre 1950 e 1960, nos Estados Unidos e em muitos países da Europa, houve um progressivo aumento em sua utilização. Os principais usos que começaram a ser adotados foram voltados para a produção de cimentos Portland, concretos de cimentos Portland e argamassas, fabricação de elementos de alvenaria e estabilização de solos com cal, visando principalmente a pavimentação. [65]

O primeiro mercado que promoveu as primeiras vendas, de ambas as companhias Walter N Handy Co. e a Chicago Fly Ash Co. foi na construção de barragens em todo o território norte americano, usando cinzas volantes como substitutas do cimento em até 60%. A primeira barragem que usou cinzas volantes fou Hungry Horse em

Montana em 1949. Em 1950 havia seis barragens construídas pelo Bureau of Reclamation e o Corps of Engineers. Em 1960 havia trinta barragens construídas com cinzas volantes supridas pela Chicago Fly Ash Co.

O segundo grande mercado para as cinzas volantes nos Estados Unidos foi na indústria de perfuração de poços, onde a cinza volante mostrou-se benéfica na cimentação de poços de petróleo. A partir daí, passaram a ser usadas em concreto em massa pelas maiores construtoras da América.

Na Europa Ocidental, no início da década de 1940, as cinzas de carvão passaram a ter uma utilização extensiva. No entanto, ao contrário dos países da América do Norte, o foco principal foi a produção de cimentos Portland. As cinzas de carvão fóssil, além dos concretos e cimentos, foram testadas também em misturas com cal visando aplicações voltadas a estabilização de solos. [46]

Durante a década de 1960, o uso das cinzas de carvão estabilizadas com aglomerantes em bases, sub-bases e reforços de subleito em pavimentos se difundiu muito na Europa. Em países como Alemanha, França, Suécia, Rússia e outros, o uso das cinzas em bases e sub-bases faz parte das alternativas convencionais, juntamente com o uso como material de aterro, tanto na forma natural como melhorada com aglomerantes, em aterros estruturais. [65]

Quanto ao aproveitamento das cinzas de carvão para a fabricação de elementos de alvenaria, tipo blocos e tijolos, já é apreciável principalmente em países do leste europeu, com grande destaque para a Rússia onde pedras artificiais do tipo blocos cinza-cal autoclavados são intensamente produzidos desde a década de 1940. Na Europa, países como Alemanha, Holanda e Inglaterra também se destacam na produção de pedras artificiais do tipo blocos silicatados autoclavados, com substituição total ou parcial das areias quartzosas por cinzas de carvão.

É importante lembrar que o espectro de formas de aproveitamento das cinzas de carvão, na atualidade, é muito mais abrangente. Há tecnologias sofisticadas que permitem, por exemplo, a extração de determinados elementos das cinzas ou a separação de determinadas frações. Há outras tecnologias em que as cinzas precisam passar por um processo prévio de tratamento para serem posteriormente aproveitadas, como catalisadores, filtros, melhoradores de trabalhabilidade e assim por diante em diferentes processos industriais.

Cabe ainda ressaltar que muitos outros países, além dos que foram citados, utilizam cinzas para os mais diferentes fins. A China é o maior produtor de cinzas do mundo, a Índia é outro grande produtor, assim como os países do leste europeu. Existem países como o Japão e Israel que estão construindo ilhas com cinzas de carvão, no oceano Pacífico e no mar Mediterrâneo, respectivamente. [45]

Em nível mundial, atualmente as cinzas volantes, as de fundo e as escórias estão firmemente estabelecidas, principalmente na Europa e América do Norte, como um subproduto comercialmente viável. Apesar das muitas aplicações criadas para os resíduos da combustão do carvão, o aproveitamento, hoje, atinge apenas cerca de 30% do total gerado e varia de continente para continente como mostra a tabela 3.

Continente	Percentagem em uso
Europa	42,5
Ásia	30,0
América	27,5
África	19,0
Oceania	10,5

Tabela 3 – Percentagem de uso das cinzas por continente (Fonte: ROHDE, 2006, p. 36)

Este baixo aproveitamento das cinzas deve-se, principalmente, às grandes quantidades produzidas e por outro lado, a falta de conscientização de muitos países, quanto a importância do uso desta matéria-prima. Deve-se salientar que alguns países europeus utilizam 100% de sua produção.

2.4 Origem e Classificação das cinzas de carvão mineral

A formação das cinzas se dá pela combustão direta do carvão, matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas: uma orgânica (material volátil e carbono fixo) e uma mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor a fração orgânica produz voláteis e coque, enquanto a mineral se transforma em cinza com mineralogia modificada, tendo em vista: a perda de água das argilas, a decomposição dos carbonatos, a oxidação dos sulfetos, etc. [48]

As cinzas consistem de componentes não combustíveis de carvão, além de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado. As

cinzas oriundas de termelétricas apresentam-se de diferentes formas conforme o processo de gaseificação ou queima do carvão e podem ser classificadas como: escória (cinza grossa ou “boiler slag”), cinza pesada (cinza de fundo, cinza úmida ou “bottom ash”) e cinza volante (cinza leve ou “fly ash”). [46]

A escória é originada nos processos de combustão ou gaseificação do carvão em grelhas fixas e móveis. Apresentam-se, frequentemente, com granulometria grosseira e blocos sintetizados, com consideráveis teores de carbono não queimado (10-20%). São retiradas pelo fundo das fornalhas, após resfriamento com água, não são arrastadas por meio hidráulico.

A cinza pesada é originada nos processos de combustão do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, contém geralmente teores de carbono não queimado de 5 a 10%. São mais pesadas e de granulometria mais grossa, que caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, de onde são retiradas por fluxo de água, principalmente nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor. [48]

A cinza volante é constituída de partículas extremamente finas (menor que 0,15mm), leves e que são arrastadas pelos gases de combustão de fornalhas ou gases gerados em gaseificadores industriais. Grande parcela dessas partículas é retida por sistema de captação- filtros de tecido, ciclones, precipitadores estrostáticos, etc. As grandes unidades produtoras deste tipo de cinzas são as usinas termelétricas e centrais de vapor. [45]

Com o surgimento da termelétrica ENEVA na grande São Luís, há uma preocupação com a sua grande produção de cinzas sem destino adequado, sendo estocadas em aterros sanitários localizados no município de Rosário. Em ambas as áreas as cinzas, secas e úmidas, chegam ao local de descarte conduzidas por caminhões basculantes apropriados, sofrendo lixiviação durante o período chuvoso.

Foto 1 – Aterro de cinzas no município de Rosário. (Fonte: *acervo do autor*)

Foto 2 – Aterro de cinzas no município de Rosário. (Fonte: *acervo do autor*)

O correto condicionamento, alternativa que sempre foi recomendada, também não representa mais, atualmente, a solução mais inteligente. Tratam-se de milhões de toneladas produzidas anualmente. Os custos são inviáveis e os riscos continuam grandes. Além disto, os crescentes custos associados com a disposição destas cinzas tendem a minimizar a atratividade do carvão fóssil, como fonte de energia, pelo custo real. [45]

As cinzas, se por um lado, são uma ameaça ao meio ambiente, por outro, representam um importante recurso mineral produzido no país tendo em vista:

- As extraordinárias propriedades físico-químicas e mineralógicas, pouco encontradas em outros materiais, caracterizadas por uma alta capacidade de reação com aglomerante do tipo cal;
- As cinzas, na prática das construções, quando empregadas na forma estabilizada com cal, além de produzirem peças rígidas passam a ter seus elementos tóxicos imobilizados e praticamente nulas as liberações de metais pesados;
- As cinzas podem ser utilizadas na forma pura (sem aglomerantes), sozinhas ou incorporadas como material inerte em cerâmicas, concretos, etc.;
- Pronta disponibilidade para o uso após a sua formação, não necessitando intervenção de processos intermediários de beneficiamento a não ser eventuais secagens quando em presença de excesso de umidade.

2.5 Uso das cinzas na engenharia civil

De uma maneira genérica, em todo o mundo, as formas de utilização das cinzas de carvão, para fins comerciais, são divididas em três categorias principais: construção, fabricação e estabilização.

2.5.1 Construção

A categoria construção é o setor que mais emprega subprodutos da combustão do carvão. Entre os inúmeros usos regulares na categoria construção destacam-se os seguintes:

- Aplicações em concreto e argamassas;
- Na fabricação do cimento Portland pozolânico;
- Cinzas em processos de estabilização sob pressão;
- Aterros estruturais;
- Aterros sem funções estruturais como material de enchimento em obra;
- Bases estabilizadas e solos modificados e estabilizados para rodovias, pistas e edificações;
- Como filer em misturas betuminosas.

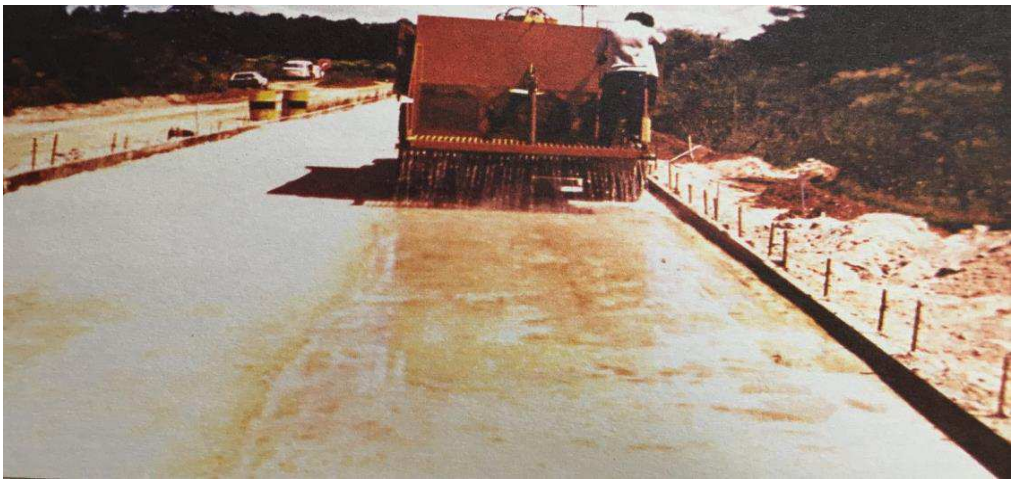


Figura 7 – Base sendo construída no trecho de acesso ao porto de Santa Clara – RS. (Fonte: Repositório CIENTEC)[5]

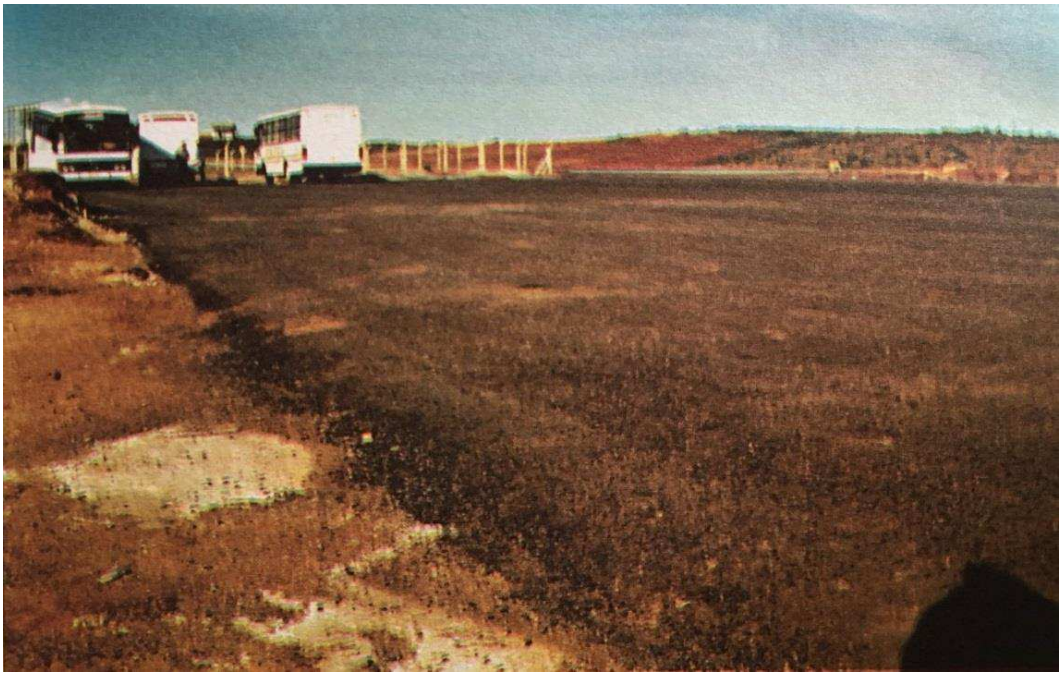


Figura 8 – Pátio de estacionamento com base de cinzas no município de Candiota – RS. (Fonte: Repositório CIENTEC)[6]

2.5.2 Fabricação

A categoria fabricação compõe os grupos industriais que tem provavelmente, o maior potencial para desenvolver novas aplicações voltadas para a construção civil. Em geral, a produção desses artefatos filia-se aos seguintes ramos principais:

- Artefatos de cinza-cal (sílico-calcários) autoclavados e curados ao meio ambiente;
- Artefatos de cimento;
- Artefatos cerâmicos de cinza e com incorporação de argila;
- Artefatos sinterizados;
- Agregados e concretos leves;

[5] Disponível em: http://www.cientec.rs.gov.br/

[6] Disponível em: http://www.cientec.rs.gov.br/

- Filer em plástico.

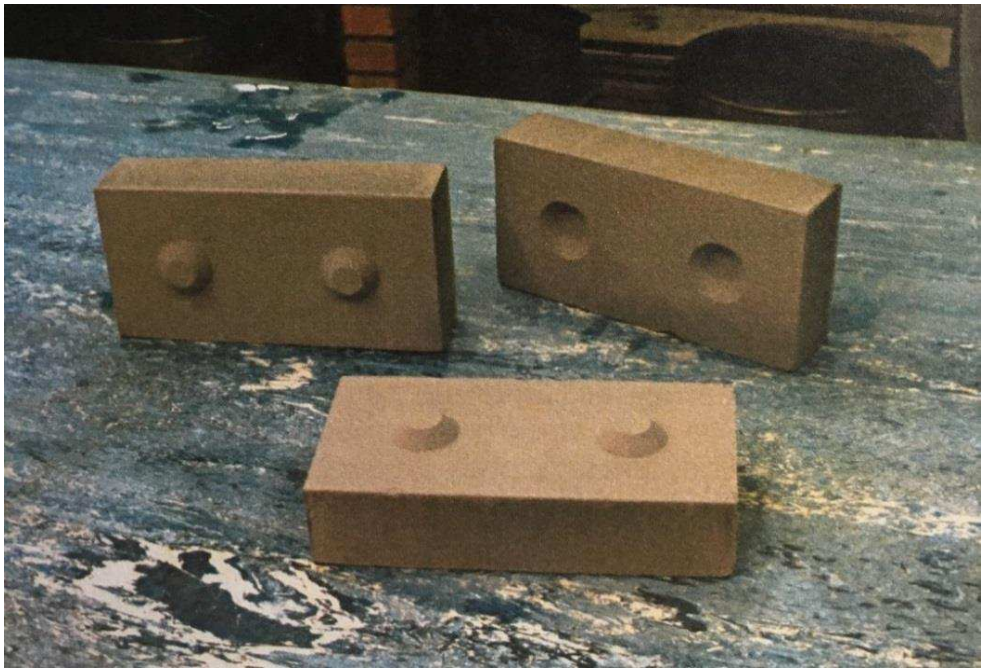


Figura 9 – Tijolo de cinza curado em autoclave. (Repositório CIENTEC)[7]

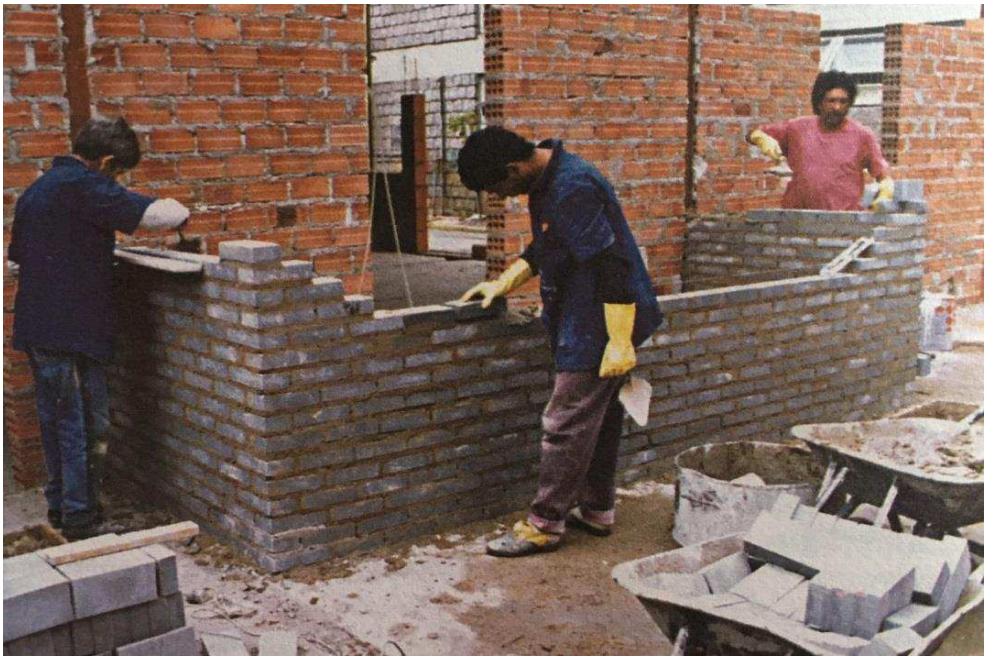


Figura 10 – Construção de alvenaria utilizando argamassa e tijolos com cinzas. (Fonte: Repositório CIENTEC)[8]

[7] Disponível em: http://www.cientec.rs.gov.br/

[8] Disponível em: http://www.cientec.rs.gov.br/

2.5.3 Estabilização de resíduos

Resíduos tóxicos tem sido imobilizados, com sucesso, pela estabilização e solidificação, usando cinzas volantes com água e produtos aglomerantes como cal, cimento Portland e gipsita. Outros aditivos podem, também, ser utilizados para tornar íons específicos insolúveis. A maior parte dos processos busca produzir uma massa endurecida com baixa capacidade de produzir lixiviação.

A maioria das aplicações tem sido usadas para estabilizar resíduos inorgânicos. Alguns resíduos orgânicos também tem sido estabilizados com sucesso. Vários processos existem no mundo, que utilizam materiais com propriedades pozolânicas, provenientes de combustão do carvão para estabilizar resíduos tóxicos.

2.6 Cimento

O cimento é composto químico com propriedades hidráulicas resultante do processo de calcinação às elevadas temperaturas, tendo ele o clínquer como principal componente, na sua composição também à presença silicato de calcário e argila, além de possuir adição de demais materiais de origem silicosa, aluminosa ou ferrífera, a fim de garantir uma melhor mistura. Segundo a NBR 11578 (1991, p.2), o cimento portland é:

> Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

O cimento Portland é o produto da moagem do clínquer tendo a sua formação de silicatos hidráulicos de cálcio, e naturalmente um percentual de sulfato de cálcio natural, podendo ter adições de algumas substâncias para modificação de algumas de suas propriedades ou facilitar o seu uso. [14]

O processo de fabricação do cimento Portland compreende-se na forma geral nas seguintes etapas: extração da matéria; britagem; moagem; pré-aquecimento; pré-calcinação; produção do clínquer; resfriamento e estocagem; moagem e adições; estocagem e expedição, como mostra a figura abaixo (FIG.11).

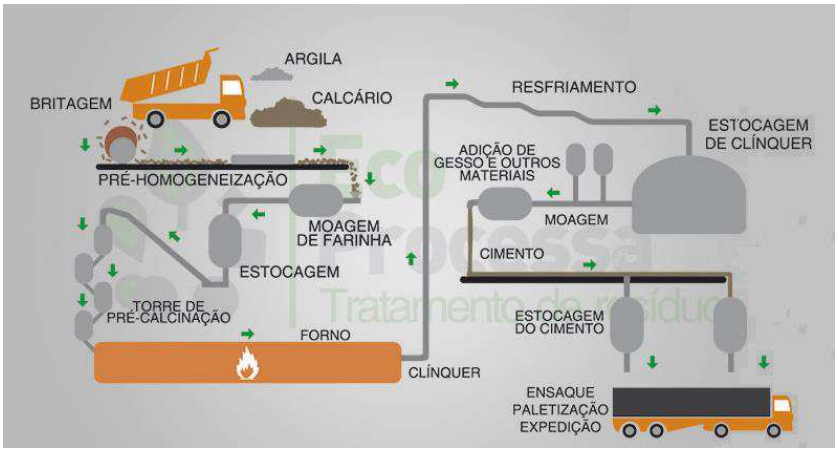


Figura 11 - Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland. (Fonte: Ecoprocessa[9], 2014.)

- ***Extração de matéria-prima:*** compreende-se na retirada de calcário e argila das jazidas, que pode vim acompanhado de outras substâncias em pequenas quantidades, que posteriormente são usadas para "correção" do cimento;
- ***Britagem:*** as substancias são britadas para que haja uma redução na granulometria.
- ***Moagem:*** o produto da britagem é moído para que estejam na granulometria adequada.
- ***Pré-aquecimento*****:** o produto da moagem é pré-aquecido em ciclones de estocagem afim de otimizar a produção e depois direcionados para a pré-calcinação.
- ***Pré-calcinação*****:** nessa etapa ocorre em temperaturas entre 600 a 900ºC, onde possibilita a dissociação do carbonato de cálcio, contido no calcário, em óxido de cálcio.
- ***Produção do clínquer****:* a farinha moída é calcinada a uma temperatura de 1450º C em um forno rotativo, resultando no clínquer.
- ***Resfriamento e estocagem****:* ocorre o resfriamento do clínquer para que ele possa ser armazenado.
- ***Moagem e adições:*** é acrescido ao clique uma quantidade de 3% a 6% de gesso e outros materiais como escórias de alto-forno, pozolana, cinzas volantes, e

[9] Disponível em: < http://ecoprocessa.net.br/coprocessamento/> Acesso em: 25 mai. 2017

materiais carbonáticos a mistura é então moída, tornando-se cimento e depois armazenada.

- ***Estocagem e expedição:*** O cimento é armazenado em silos e depois enviados para o ensacamento ou venda a granel.

O cimento Portland é o material mais utilizado na produção do concreto. Como anteriormente citado, ele é um aglomerante hidráulico resultado da moagem do clínquer onde no mesmo é acrescentado aproximadamente de 5% de gipsita[10] com a finalidade de impedir a pega instantânea. Portanto, o cimento é constituído essencialmente de cálcio e sílica, havendo outros minerais que constituem as impurezas.

O percentual representativo dos óxidos básicos e ácidos, que constituem a matéria-prima no processo de produção do clínquer, são os seguintes de acordo com a tabela a seguir (TAB. 4):

Óxidos	**Teor %**
CaO	67
SiO_2	22
Al_2O_3	5
Fe_2O_3	3
Outros	3

Tabela 4 - Proporção de óxidos no cimento Portland (Fonte: Taylor, 1997)

A gipsita era a única fase de sulfato de cálcio adicionada durante o processo de fabricação do cimento, mas no processamento atual, podem ser encontradas outras formas de sulfato de cálcio, como anidrita natural cristalizada ou solúvel, gesso desidratado e sulfato de cálcio sintético. Também pode ser encontrado fosfogesso[11], resíduo da indústria de ácido fosfórico (H_3PO_4). [3]

Como se trata de uma adição durante o processo de fabricação e são compostos de diferentes arranjos e até mesmo composição química, e também possuem um grau de solubilidade diferente, que pode ser essencialmente modificado na presença de um plastificante, todas essas variáveis resultam na modificação do equilíbrio do grau de solubilidade do cimento na fase de C_3A. Sendo assim, mediante a todas essas variáveis,

[10] Composto de sulfato de cálcio dihidratado, que presenta uma coloração branca a translúcida e dureza baixa, sendo umas das principais meterias-prima na fabricação de gesso e cimento.
[11] É o subproduto do processo de produção de ácido fosfórico, utilizado na fabricação de fertilizantes fosfatados.

pode ocorrer uma pega instantânea no cimento, mesmo com todo o processo tecnológico envolvido no processo de fabricação.

Os compostos apresentados na tabela acima (TAB 4), reagem quimicamente resultando em quatro principais compostos do cimento como mostra a tabela abaixo (TAB 5).

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcio	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcio	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcio	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcio	$4CaO.Al_2O_3. Fe_2O_3$	C_4AF

Tabela 5 - Constituintes principais do cimento Portland. (Fonte: Aïtcin, 2000)

O processo de formação do clínquer que ocorre em altas temperaturas, há presença de outros elementos que são considerados impurezas no sistema, como no caso de magnésio, sódio, potássio e enxofre (Mg, Na, K e S), que têm a capacidade de reagirem com os principais compostos, trazendo defeitos à estrutura cristalina dos mesmos (MELO, 2000).

Além dos principais constituintes, o cimento também apresenta elementos secundários como Mn_2O_3, MgO, K_2O, TiO_2 e Na_2O, os quais possuem um percentual representativo menor mediante a massa total do cimento. Alguns desses elementos podem ser prejudiciais à composição do cimento, como no caso do óxido de magnésio (MgO), conhecido como periclásio, quando se encontra em sua forma cristalina, onde o mesmo possui uma hidratação expansiva e lenta. Como também no caso dos óxidos de potássio e sódio (K_2O e Na_2O), que são conhecidos como álcalis, e sua grande presença na composição da massa do cimento propicia o surgimento das reações álcali-agregado. [33]

Para se obter uma boa resistência inicial e final no concreto, devem-se levar em consideração importantes fatores como: a composição química e mineral, forma do grão e distribuição granulométrica. Pois quanto maior percentual de finura do cimento, o processo de hidratação e reação ocorrem com maior velocidade. Já em relação a trabalhabilidade do cimento dependerá da distribuição granulométrica e do teor de C_3A presentes no cimento. O teor de C_3A no cimento também está relacionado com o surgimento da corrosão da armadura, pois o mesmo determina a reação com os íons de cloreto. Com isso quanto maior o teor de C_3A, menor a concentração de cloretos livres

(Cl^-), possibilitando a maior formação de cloroaluminatos, reduzindo a ocorrência de corrosão da armadura. [33]

A troca iônica consiste num mecanismo ou processo de transferência de íons, que ocorre geralmente entre duas fases, que são a parte aquosa e sólida. Como o concreto se trata de uma mistura complexa, o mesmo sofre um processo intenso de troca iônica, quando a estrutura do concreto é instalada no meio aquoso, como por exemplo em pontes, postes e estruturas portuárias. Nas áreas de influência de mares há um intenso contato entre a estrutura de concreto (soluto) e o meio aquoso (solvente), onde intensas reações de troca iônica se processam, promovendo o envelhecimento precoce das estruturas. [44]

2.6.1 Hidratação do cimento

O termo hidratação em relação à química do cimento refere-se a todas as trocas ou alterações que ocorrem no cimento quando o mesmo entra em contato com a água. Essa reação é de alta complexidade, por isso são abordados somente os produtos da reação de hidratação. O mecanismo de hidratação do cimento Portland pode ser compreendido em duas formas, através da dissolução-precipitação que ocorre nos estágios iniciais da reação e topoquímico ou hidratação no estado sólido que ocorre nos estágios seguintes da reação. [57]

O processo de dissolução-precipitação compreende-se na dissolução dos compostos anidros e na formação de hidratos devido a sua baixa solubilidade na solução, ocasionando a precipitação do hidrato. Esse processo proporciona uma reorganização completa dos compostos e corresponde a 30% de todo o processo, tendo uma duração de 3 a 24 horas. O processo topoquímico pode ser compreendido quando ocorre a movimentação iônica da solução e torna-se restrita ocorrendo na superfície cimento anidro quando o mesmo não entra em solução.

A hidratação do cimento compreende-se na hidratação dos seus principais componentes que são: silicato tricálcio (C_3S), silicato dicálcio (C_2S), aluminato tricálcio (C_3A) e ferroaluminato tetracálcio (C_4AF), conforme mostrado anteriormente na tabela 1. Através da hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF) é que ocorre o endurecimento da pasta e a resistência é obtida através da hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S). Já a velocidade da hidratação é variável de acordo com cada um dos principais compostos,

sendo que o do C_3A é a maior, sendo seguida respectivamente pelos demais compostos C_3S, C_4AF e C_2S. [48]

Apesar que cada composto possuí sua hidratação, há uma interação entre eles durante o processo total da hidratação do cimento, mas é interessante analisar como se comporta a hidratação de cada composto. Isso pode ser observado através dos compostos C_3S e C_2S que são originados da hidratação do silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_3$) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). O volume de sólidos presente na pasta do cimento após sua hidratação total tem uma representação de 50% a 60% de CSH, e pode se apresentar na forma de fibras cristalinas até retículos cristalinos, tendo também uma variação de área específica na faixa de 100 m^2/g a 700 m^2/g. [37]

O composto $Ca(OH)_2$ possui uma forma definida de prismas hexagonais que se expende até ocupar todo espaço disponível, tem uma representação de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta totalmente hidratada. Esse composto não contribui na resistência do concreto, por possuir baixa força de Van Der Wall, que são forças de ligação fraca, dissolvendo-se facilmente na presença de água. Esse fenômeno favorece formação de alcalinidade do meio e a e passivação da armadura. [20]

As reações químicas da hidratação do cimento podem ser expressas, de forma resumida, pelas seguintes equações:

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow \underset{(61\%)}{C_3S_2H_3} + \underset{(39\%)}{3Ca(OH)_2} \quad (1)$$

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow \underset{(82\%)}{C_3S_2H_3} + \underset{(18\%)}{Ca(OH)_2} \quad (2)$$

A formação da microestrutura do cimento pode ser dividida em três estágios, tendo cada estágio um tempo de atuação diferente dos demais, conforme descrito a seguir:

- ***Estágio 1:*** etapa inicial que compreende a pré-indução e indução, pois após o primeiro contato com a água há uma formação de uma membrana rica em alumina e sílica que fica envolta dos grãos. Após 10 minutos há uma pequena formação de etringita (AFt) e todo esse processo ocorre na área superficial do grão, não tendo contato direto sobre o mesmo.

- ***Estágio 2:*** denominado como o período da hidratação que ocorre num período de 3 a 24 horas, onde ocorre a formação de 30% do volume sólido do cimento, com a presença de $Ca(OH)_2$ e $C_3S_2H_3$. O $C_3S_2H_3$ envolve os grãos possibilitando o envolvimento total da AFt, onde a mesma é arrastada para o centro da membrana. Nessa fase ocorre a formação de espaços entre o anidro e a camada externa da membrana, onde esse espaço é preenchido por uma solução concentrada de silicatos anidros, pois essa é a etapa da dissolução precipitação, a dissolução dos silicatos e a precipitação na camada externa do grão.
- ***Estágio 3:*** denominado período final da hidratação, onde há uma redução da permeabilidade da membrana envoltória dos grãos, ocorre o depósito de $C_3S_2H_3$ na região interna do grão tendo esse processo uma duração de 7 dias. Há uma queda da concentração de sulfatos devido a transformação de AFt em monosulfato (AFm).

Na figura a seguir (FIG.12), mostra uma representação simbólica do processo de hidratação do cimento:

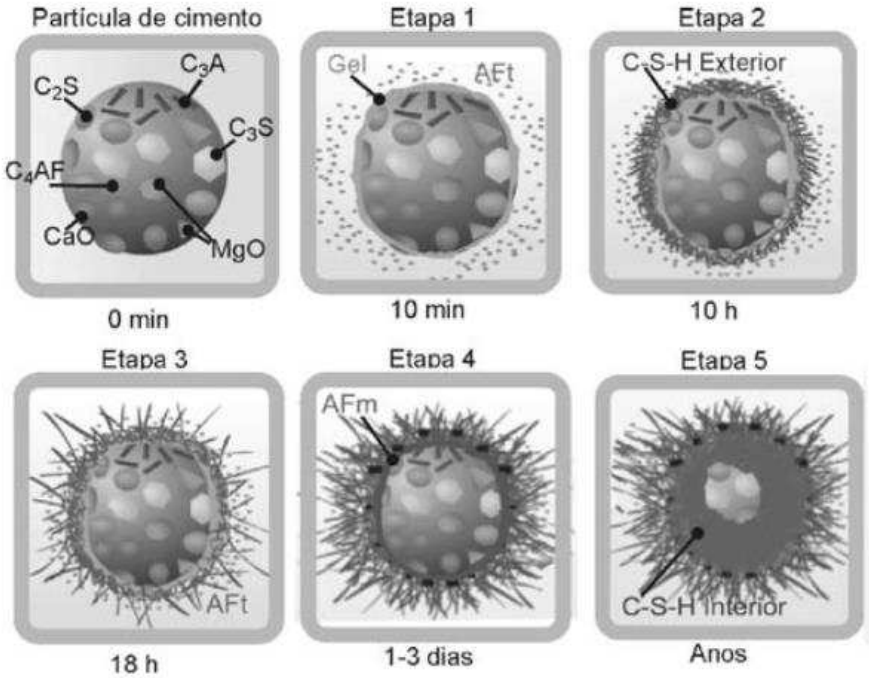


Figura 12 - Etapas do processo de hidratação do cimento. (Fonte: Scrivener apud Taylor, 1997).

O composto C_3A é o grande responsável pela quantidade de álcalis (Na_2O) que estarão presente na pasta, onde esse fator estará ligado diretamente as propriedades do escoamento, da plasticidade e da viscosidade da pasta. [3]

Quando o C_3A está na forma cúbica, ele é altamente reativo com os íons de sulfato, formando uma camada envoltória de etringita (AFt) sobre o composto do C_3A, onde o C_3A é responsável pela inibição do processo da hidratação, com isso os íons de sulfatos estão liberados na pasta de uma forma mais rápida. Quando o C_3A está na forma ortorrômbica, sua reação com o etringita (AFt) é mais lenta e expansiva.

Deve haver um equilíbrio entre os elementos como os íons sulfato, cálcio e alumínio no interior da pasta no estado fresco, afim de se evitar uma pega instantânea, devido a formação rápida de aluminato de cálcio hidratado.

2.7 Concreto de cimento Portland

O concreto é um material muito utilizado na construção em todo mundo. Devido a sua propriedade de fácil aplicação, por estar em um estado maleável, que possibilita ser moldado da forma que se deseja, e após o seu processo de pega, apresenta uma grande rigidez, possibilitando que o mesmo resista aos esforços. Mas a negligência no processo de fabricação, dosagem, execução, manutenção são fatores agravantes para a degradação acelerada das estruturas.

O concreto é um dos grandes marcos da tecnologia, pois o mesmo possibilitou um grande avanço na civilização e no desenvolvimento de grandes cidades. Mesmo sendo considerado um material recente utilizado na construção civil, ele pode ser considerado um avanço no desenvolvimento e na qualidade de vida das civilizações. Os materiais cimentícios usados na construção, possibilitaram suprir as necessidades de moradia, lazer e saúde de uma determinada população. [25]

Conforme Martin (2005), o concreto é um dos materiais de importância vital para civilização e o desenvolvimento da mesma. Tendo uma ótima triagem dos componentes, um bom controle tecnológico na parte de dosagem, esses cuidados interferem no resultado final do concreto, que pode ser de boa ou péssima qualidade, atendendo ou não às exigências solicitadas. De posse dessas variáveis, é possível gerenciar o tempo de pega, a resistência, a trabalhabilidade, a porosidade e a densidade, e especialmente a durabilidade estendendo a vida útil da estrutura. [31]

A combinação das características do aço, que é de grande resistência à tração e flexão, e do concreto, que é de grande resistência à compressão axial, abre um grande leque de possibilidades de uso, tornando o concreto armado um dos materiais mais utilizados no mundo.

Há diferentes tipos de causa para deterioração da armação do concreto, e as causas mais comuns são: ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, e corrosão devido à carbonatação ou atuação de cloretos, entre outros. Devido ao oneroso valor econômico que se tem para reabilitação da estrutura comprometida, ou a garantia da durabilidade da mesma impulsiona a geração de frentes de pesquisas para melhoria da produção e execução das estruturas.

2.7.1 Agregados

No início dos estudos sobre o concreto, os agregados eram considerados materiais inertes e com a finalidade de reduzir o custo na produção. Agregado é o material particulado, inocoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. [14]

Com o avanço das pesquisas, fez-se necessário um maior conhecimento da interferência que o agregado tem na composição do concreto, pois pode-se observar que o mesmo influencia em muitas propriedades como: porosidade, granulometria, textura, resistência mecânica, absorção d'água, módulo de deformação entre outas propriedades.

Os agregados constituintes do concreto são materiais disponíveis na natureza, originadas de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares. Os mesmos são classificados de acordo com a origem, densidade e forma.

Dentre todas as rochas disponíveis na natureza, as que apresentam uma melhoria na composição do concreto são as ígneas e metamórficas, por possuírem maior densidade, já as sedimentares apresentam condições inferiores, devido a sua alta porosidade e baixa resistência mecânica. [14]

Além da sua origem e composição química dos agregados, também deve-se considerar a sua parcela de atuação na composição do concreto, um desses fatores é a questão da absorção de água e a tensão superficial que o agregado irá impor na composição do concreto, pois esses fatores influenciam na resistência e na durabilidade do mesmo.

Também deve-se ter um controle rigoroso na distribuição granulométrica e no tamanho dos grãos, pois a grande presença de finos no agregado requererá uma maior quantidade de água de mistura, trazendo uma variação no teor água/cimento, modificando assim as propriedades finais do concreto.

O formato dos grãos e sua superfície, são responsáveis pela ligação da pasta e do agregado, com isso influenciando na trabalhabilidade e no adensamento do concreto. Quanto maior a porosidade da superfície do agregado maior será a interação do agregado com a matriz do cimento. Sendo assim, os agregados originados de rocha britada, trazem uma maior aderência em relação aos agregados provenientes de pedregulhos e seixo.

As formas geométricas dos agregados também devem ser levadas em consideração, pois alongadas e chatas tendem acumular água, possibilitando que ocorra exsudação, trazendo uma maior porosidade à zona de transição, aumentando o aparecimento de fissuras. Além de que as partículas desse tipo exigem mais água de amassamento, por possuírem uma área superficial maior para um mesmo volume, em relação as outras formas geométricas dos agregados. [51]

A distribuição granulométrica do agregado deve ser feita a fim de trazer uma maior densidade no empacotamento das partículas, gerando um menor consumo de cimento, mantendo uma boa trabalhabilidade e um reduzindo os custos da obra. Sendo assim, as características físicas e químicas dos agregados têm sido bastante estudadas, visando-se à obtenção de um melhor adensamento do concreto. [37]

2.7.2 Água

A água tem uma ligação direta com o fator resistência do concreto, pois através da relação água/cimento é possível determinar alguns aspectos do concreto como: trabalhabilidade, resistência mecânica, transporte, tempo de lançamento e adensamento, tempo de pega e cura.

Quanto mais água estiver disponível na mistura, há uma maior susceptibilidade para o surgimento de vazios, pois durante o processo exotérmico do concreto, essa água irá evaporar, deixando pontos falhos no concreto. [64]

A água que será utilizada no processo de produção do concreto deve possuir boa qualidade, e ser armazenadas de forma que não haja contaminação de substâncias

como óleos, graxas e outras substâncias que irão interferir no arranjo químico e nas propriedades físicas do concreto.

2.7.3 Microestrutura do concreto com cimento Portland

O concreto possui uma estrutura de alta complexidade, pois a relação entre a estrutura e as propriedades, depende de vários fatores que vão desde da escolha do material, forma de aplicação e manutenção da estrutura final. O concreto é uma solução heterogênea que passa por diversas reações químicas, que resulta em seu estado final na forma sólida, e essa alteração possibilita o surgimento de vazios em seu interior de formas e tamanhos variados. Esses vazios estão intricadamente ligados a uma das principais propriedades do concreto que é sua permeabilidade.

As propriedades mecânicas do concreto não dependem somente das propriedades e características individuais dos aglomerantes e agregados, mas principalmente ada interação entre eles, que pode ser vista através da zona de transição interfacial – ITZ. Pois quando a estrutura de concreto é solicitada, é na zona de transição interfacial que ocorre a propagação das microtrincas presentes, e as mesmas se propagam até a interface do concreto. [48]

A zona de transição possui características distintas do restante da mistura, que se modifica de acordo com seus componentes. Trata-se de uma camada de alta porosidade que envolve todo o agregado e sua espessura varia entre 10 de 50 μm. Por ser considerado o ponto de menor resistência do concreto em relação as outras zonas, tendo ela uma maior influência no comportamento mecânico e na durabilidade da estrutura de concreto. [32]

Dentre toda a estrutura do concreto a ITZ, não aparece somente entre os agregados, mas também nas zonas do concreto que estão em contato com a armação. Os dois efeitos no concreto que são oriundos da ITZ são o efeito na superfície do agregado e a exsudação interna. Pois é nessa zona que há maior tendência de acúmulo de água que envolve o agregado, aumentando a porosidade do local, propiciando a expansão dos cristais de hidróxido de cálcio (CH) e etringita, possibilitando o surgimento das primeiras fissuras. Essa expansão ocorre de uma forma aleatória no interior da pasta do cimento, mas em sua grande parte possuem uma orientação perpendicular em relação a superfície do agregado (FIG. 13). [32]

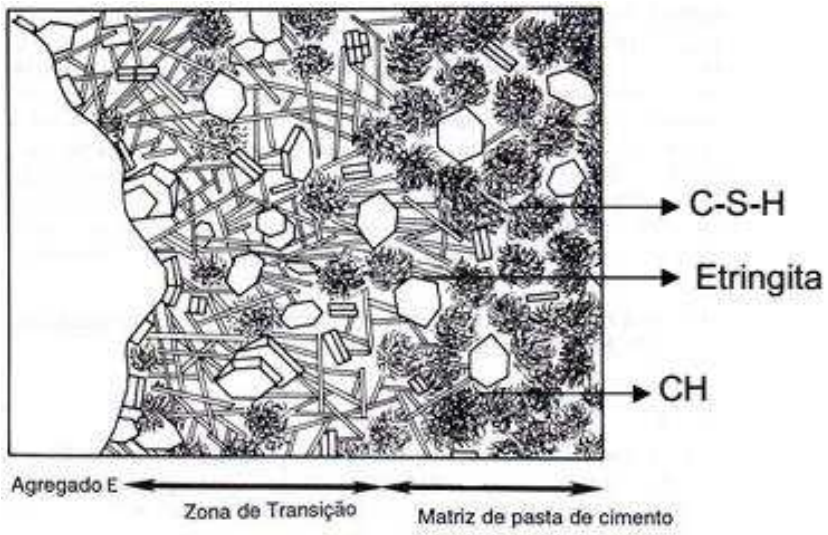


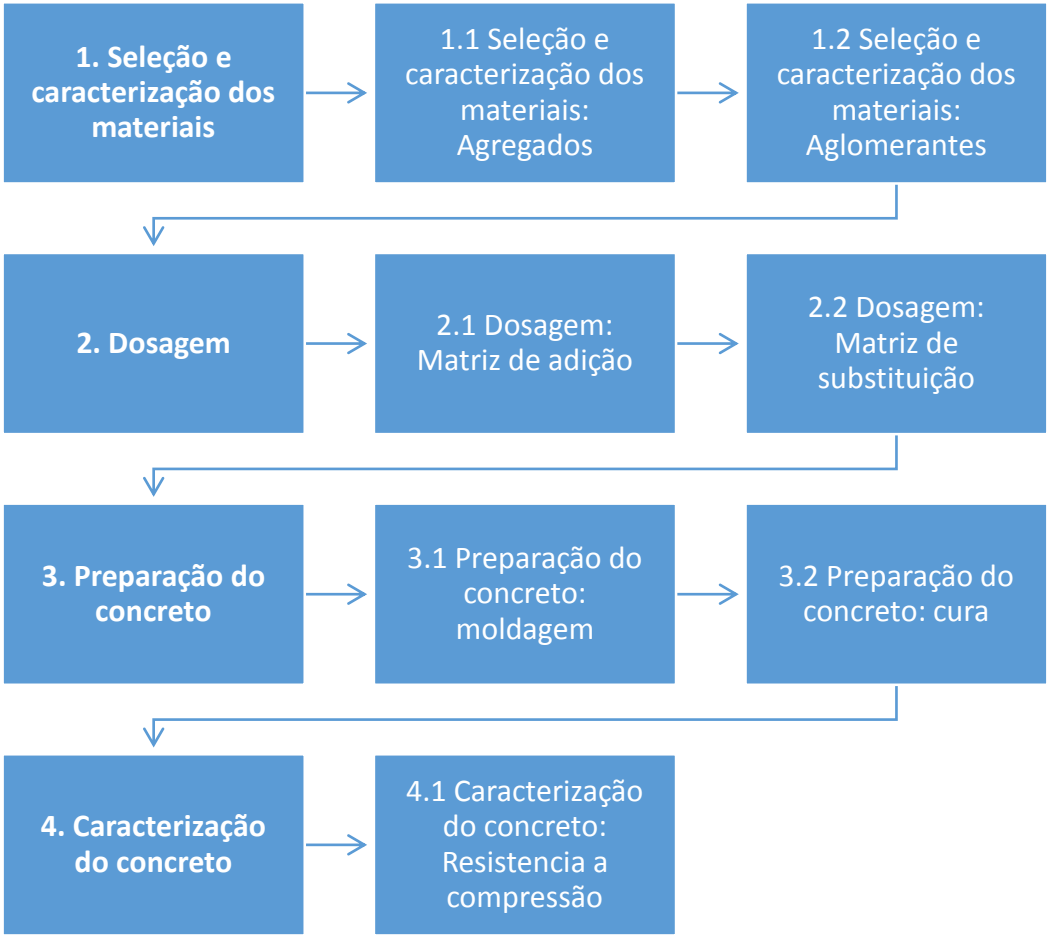
Figura 13 - Zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. (Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.)

Quando se trata do processo de hidratação do cimento e principalmente em regiões costeiras, onde as estruturas de concreto interagem diretamente com água de elevada concentração de cloreto, necessita-se de conhecimentos mais detalhados das interações do concreto com a água do mar.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados estudos do comportamento das estruturas de concreto, tendo como objetivo à avaliação da resistência à compressão com adição e substituição das cinzas volantes. Para compreensão dos cenários, foram verificadas as seguintes variáveis, como: dosagem do concreto (traço), a relação água\cimento e condições de cura.

Na presente pesquisa, a metodologia utilizada teve as seguintes etapas: seleção e caracterização dos materiais; definição do traço de concreto (dosagem); preparação do concreto; caracterização do concreto.



3.1 Seleção dos materiais

Para a produção de concreto deste estudo foram utilizados: cimento, areia, brita, água e cinzas volantes.

3.1.1 AGREGADOS

Os agregados selecionados para este estudo foram areia (agregado miúdo) e brita (agregado graúdo). A areia utilizada foi do tipo de dragagem e o agregado graúdo foi a brita 0, ambos cedidos pela Prefeitura do CAMPUS Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão.

Os agregados foram caracterizados quanto à massa específica, umidade e a composição granulométrica no laboratório de concreto do departamento de estruturas e construções da Universidade Estadual do Maranhão. Antes dos ensaios de caracterização, os agregados foram submetidos a secagem em uma estufa a 110º C durante 24 horas.

3.1.1.1 Massa específica e massa específica aparente

A massa específica aparente do agregado miúdo foi determinada de acordo com a norma Mercosul [33], a partir da equação 3.1.

$$\rho_{apm} = \frac{m_s}{V_f - V_a} \tag{3.1}$$

Onde:

ρ_{apm} é a massa específica aparente do agregado miúdo (g/cm³);

V_f é o volume do frasco (cm³);

V_a é o volume de água adicionado (cm³).

Massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis.

Já a massa específica foi calculada pela equação 3.2, conforme a norma 9776/1987 da ABNT. O resultado obtido foi a partir da média de duas amostras.

$$\rho_m = \frac{500}{L-200} \tag{3.2}$$

Onde:

ρ_m é a massa específica do agregado miúdo (g/cm³);

L é a leitura do frasco (volume ocupado pela mistura água-agregado miúdo).

A massa específica e a massa específica aparente do agregado graúdo foram determinadas de acordo com a Norma Mercosul 53 [33], em que se utilizaram as equações 3.3 e 3.4 respectivamente.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \tag{3.3}$$

Onde:

d é a massa específica do agregado seco (g/cm³);

m_a é a massa da água da amostra (g);

m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

$$d_a = \frac{m}{m - m_a} \tag{3.4}$$

Onde:

d_a é a massa específica aparente (g/cm³);

m é a massa ao ar da amostra seca em estufa (g);

m_a é a massa em água da amostra saturada (g).

Foto 3 – Ensaio de agregado graúdo no laboratório de concreto da UEMA. (Fonte: *acervo do autor*)

3.1.1.2 Umidade do agregado miúdo

A umidade dos agregado miúdo foi determinada de acordo com a norma DNER-ME 213/94 pela equação 3.5

$$h = \frac{m_u - m_s}{m_s - m} \; x \; 100 \qquad (3.5)$$

Onde:

h é a umidade (dada em porcentagem);

m_u é a massa úmida correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material úmido (g);

m é a massa do recipiente (g);

m_s é a massa seca correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material seco (g).

Foto 4 – Cápsulas na estufa para determinação de teores de umidade. (Fonte: *acervo do autor*)

3.1.1.3 Composição granulométrica

A determinação granulométrica dos agregados foi executada por peneiramento, de acordo com as exigências da norma Mercosul 248 – agregados – Determinação da composição granulométrica.

Foram utilizadas a seguinte sequência de peneiras: 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600 µm; 300µm e 150µm. Já para a brita, as peneiras de 25mm; 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm; 4,75mm; 2,36mm; e 1,18mm foram utilizadas.

3.1.2 AGLOMERANTES

O cimento selecionado foi o cimento Portland CP IV – 32 RS, marca Apodi usado em obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos, também com alta

resistência à expansão devido à reação álcali-agregado. O cimento utilizado foi cedido pela Prefeitura do CAMPUS Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão.

As cinzas volantes foram obtidas da termelétrica ENEVA, situada na cidade de São Luís – MA. Os aglomerantes foram caracterizados quanto ao peso específico, de acordo com a norma NBR 6474/2001 no laboratório de concreto do departamento de estruturas e construções da Universidade Estadual do Maranhão.

3.1.2.1 Peso específico

O pesos específicos dos aglomerantes foram determinados de acordo com a norma NBR 6474/2001, pela equação 3.6.

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} \tag{3.6}$$

Onde:

γ é o peso específico dado em (g/cm³);

m é massa do aglomerante (g);

V_1 é a leitura do volume inicial em (cm³);

V_2 é a leitura do volume final em (cm³).

Foto 5 – Ensaio de peso específico dos aglomerantes. (Fonte: *acervo do autor*)

3.2 Dosagem

Para a elaboração dos corpos de prova, foram utilizados os insumos acima listados, para obtenção de um concreto sem característica de resistência específica, fator água/cimento de 0,70 e com um traço de 1:2:3.

Os materiais foram misturados com o auxílio de uma betoneira, marca CSM e modelo CS 150L, de eixo inclinado até que a perfeita homogeneização dos constituintes fosse alcançada. O adensamento foi realizado com o auxílio da haste de socamento, com as dimensões de acordo com a NBR 5738/1994.

Foram confeccionados 24 unidades de corpos de prova adicionando as cinzas volantes a 10, 20 e 30% da massa de cimento. Os corpos de prova são no formato cilíndrico nas dimensões de 200x100mm, sendo que após 24 horas da confecção estes corpos foram submetidos a uma cura por via úmida (imersão no tanque de água), de acordo com a NBR 9479/1994, com tempo de cura de 7 e 14 dias.

Para o concreto com substituição do cimento por cinzas volantes foram confeccionados 18 unidades de corpos de prova cilíndricos com as seguintes dimensões 200x100mm. Os corpos de prova foram submetidos a cura por via úmida com tempo de cura de 7 e 14 dias. Todos os corpos foram postos em solução comum de água potável.

Formulações		Porcentagem de adição
		Cinza volante
1	Concreto REF (referência)	Sem adição
2	Concreto CV – 10	10%
3	Concreto CV – 20	20%
4	Concreto CV – 30	30%

Tabela 6 – Formulações e porcentagens de adição de concretos

Formulações		Porcentagem de substituição	
		Cimento (subtração)	Cinza Volante (adição)
1	Concreto REF (referência)	0%	0%
2	Concreto 5 - 20	5%	20%
3	Concreto 10 - 20	10%	20%

Tabela 7 – Formulações e porcentagens de substituição de concretos

3.3 Preparação do concreto

3.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico, com dimensões, anteriormente citadas, de 200x100mm, de acordo com a norma NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto [8].

Antes de iniciar a moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo diesel queimado, para facilitar a posterior desmoldagem.

Os corpos foram moldados em duas camadas adensadas em mesa vibratória. A vibração foi finalizada quando a superfície do concreto apresentou aspecto relativamente liso e praticamente sem o aparecimento de bolhas de ar.

Foto 6 – Preparação do concreto (Fonte: *acervo do autor*)

Na tabela a seguir, é apresentada a quantidade de corpos de prova para o ensaio realizado. Para a resistência a compressão foram ensaiados 6 corpos de prova para cada formulação, 3 para 7 dias de idade e 3 para 14 dias de idade.

Quantidade de corpos de prova por formulação de adição			
Formulação	Resistencia a compressão		Total
	Idade		
	7 dias	14 dias	
Concreto REF (referencia)	3	3	6
Concreto CV - 10	3	3	6
Concreto CV - 20	3	3	6
Concreto CV - 30	3	3	6
			24

Tabela 8 – quantidade de corpos de prova para a formulação de adição

Quantidade de corpos de prova por formulação de substituição			
Formulação	Resistencia a compressão		Total
	Idade		
	7 dias	14 dias	
Concreto REF (referencia)	3	3	6
Concreto 5 - 20	3	3	6
Concreto 5 - 20	3	3	6
			18

Tabela 9 – quantidade de corpos de prova para formulação de substituição.

Foram executadas 7 formulações, sendo 6 corpos de prova para cada uma delas, totalizando 42 corpos de prova. Após a moldagem, os moldes foram colocados sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra causa que possa perturbar o concreto, conforme a foto 7.

Foto 7 – Corpos de prova moldados. (Fonte: *acervo do autor*)

3.3.2 Cura

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados. A cura de todos os corpos de prova foi com imersão no tanque de água, até atingir a idade de 7 e 14 dias.

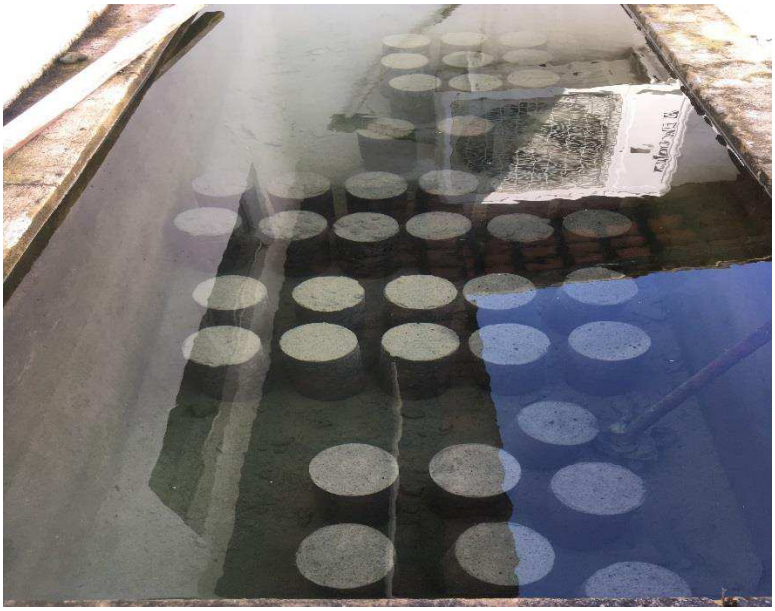


Foto 8 – Cura dos corpos de prova (Fonte: *acervo do autor*)

3.4 Caracterização dos concretos

3.4.1 Resistencia à compressão

O capeamento das faces dos corpos de prova para a aplicação das cargas no ensaio de compressão axial foi realizado pelo método do capeamento colado, com a utilização de pasta de cimento e gesso. Segundo a norma DNER-ME 046/98, o material a ser utilizado no capeamento deve ter: aderência ao corpo de prova, compatibilidade química com o concreto, fluidez no momento da aplicação, acabamento liso e plano após o endurecimento.

O ensaio de resistência a compressão foi feito aos 7 e 14 dias, obedecendo as recomendações da norma brasileira NBR 5739 [9]. Para cada idade, foram ensaiados 3 corpos de prova para cada formulação.

Foi utilizada uma máquina universal de ensaios, marca SOLOTEST, modelo ST 20000, capacidade máxima de carga de 200 toneladas, que se encontra no laboratório de Concreto da Universidade Estadual do Maranhão. Para isto, foi utilizada uma velocidade de carga de 0,45 MPa/s para todo os corpos de prova ensaiados.

A ABNT [9] recomenda que a resistência a compressão deve ser obtida, dividindo-se a carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, devendo o resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa.

Foto 9 – Ensaio de compressão axial (Fonte: acervo do autor)

Os dados da caracterização do concreto foram analisados estatisticamente, através do software Assistat 7.7. Foram realizados os testes de normalidade; para verificar se os dados terão distribuição normal, uma condição exigida para a realização de muitas inferências válidas a respeito de parâmetros populacionais; e o teste de Tukey, para a verificação de contraste entre duas médias ou mais de tratamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das matérias-primas

4.1.1 AGREGADOS

4.1.1.1 Agregado graúdo

A tabela 10 apresenta as porcentagens de massa retida acumulada e passante, o diâmetro máximo, o módulo de finura e o índice de material pulverulento do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Massa retida acumulada (%)	Massa passante (%)
25	0.00	100
19	0.00	100
12.5	4.98	95.02
9.5	33.21	66.79
6.3	69.19	30.81
4.75	91.93	8.07
2.36	99.84	0.16
1.18	99.92	0.08

Diâmetro Máximo (mm)	12,5
Módulo de finura	3,25
Índice de material pulverulento (%)	0,917

Tabela 10 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

O diâmetro máximo de 12,5mm e o módulo de finura de 3,25 do agregado graúdo encontram-se dentro de intervalos normalmente encontrados para a brita 0. A curva de distribuição granulométrica está apresentada no gráfico 1.

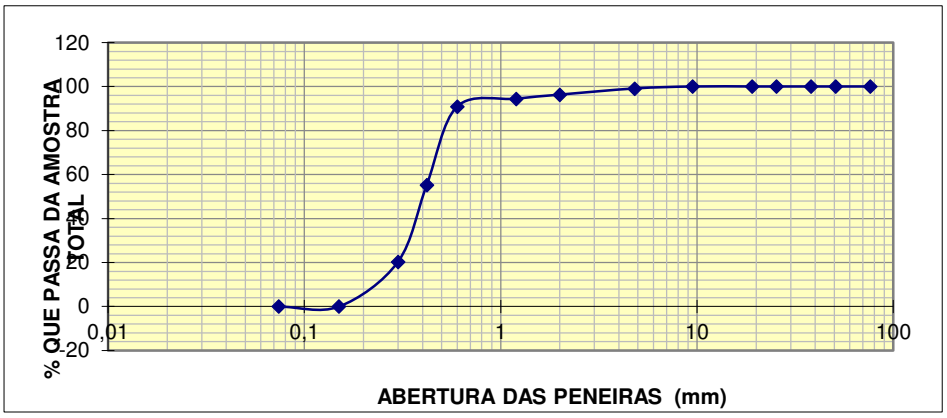


Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo

Pode-se observar no gráfico 2 que o agregado graúdo apresenta maior porcentagem de massa retida acumulada no intervalo de 12,5mm a 6,5mm. O agregado apresentou massa específica de 2,85 g/cm³, entretanto o índice material pulverulento encontra-se abaixo do limite estabelecido (1%) pela NBR 7211 (2009).

4.1.1.2 Agregado miúdo

A tabela 11 apresenta as porcentagens de massa retida acumulada e passante, diâmetro máximo, o módulo de finura e o índice de material pulverulento do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Massa retida acumulada (%)	Massa passante (%)
4.75	0.91	99.09
2.36	3.72	96.28
1.18	5.57	94.43
0.6	9.13	90.87
0.3	44.75	55.25
0.15	79.63	20.37
Diâmetro Máximo (mm)		4.75
Módulo de finura		2.44
Índice de material pulverulento (%)		2.65

Tabela 11 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

A curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada no gráfico 2.

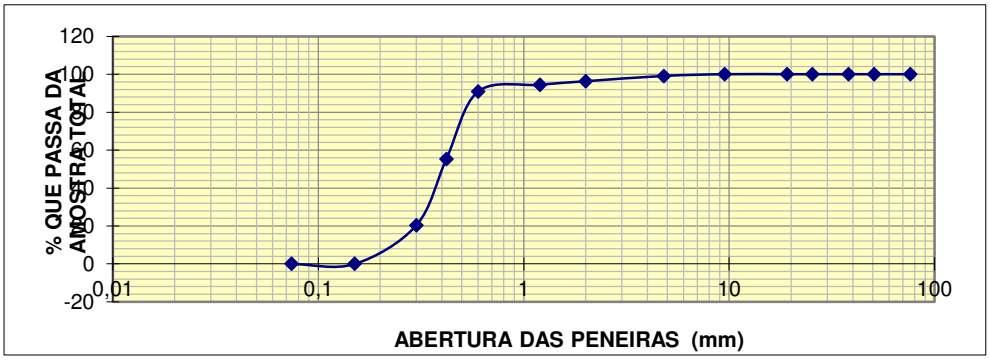


Gráfico 2 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Observa-se, a partir da distribuição granulométrica do agregado miúdo mostrado na Tabela 11 e no gráfico 3, a predominância do tamanho de partículas entre 600µm e 150µm. O índice de material pulverulento do agregado miúdo de 2,65% é considerado ótimo para utilização em concreto submetido a desgaste superficial, uma vez que está abaixo do limite estabelecido (3%) pela NBR 7211.

Quanto menor o módulo de finura e maior o índice de material pulverulento, maior será a área superficial, consequentemente maior será a quantidade de água necessária para a mistura do concreto fresco e maior a quantidade de pasta de cimento para revestir as partículas.

A umidade do agregado miúdo foi tomada para cada formulação, tanto de adição quanto de substituição. Para a formulação de adição, o teor de umidade resultou em 4,23% e para a formulação de substituição, o teor resultou em 1,18%.

4.1.2 AGLOMERANTES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi avaliado o peso específico dos aglomerantes, afim de que se determinasse tal característica segundo a norma NBR 6474 – Determinação de peso específico para cimento Portland e outros materiais em pó. O cimento Portland apresentou peso específico de 2,715 g/cm³, enquanto a cinza volante apresentou 2,625 g/cm³.

4.2 Resistencia a compressão

A resistência característica do concreto apresentou um aumento ao se adicionar as cinzas volantes em relação ao concreto de referência. Este comportamento também foi encontrado em estudos similares. [48,56]

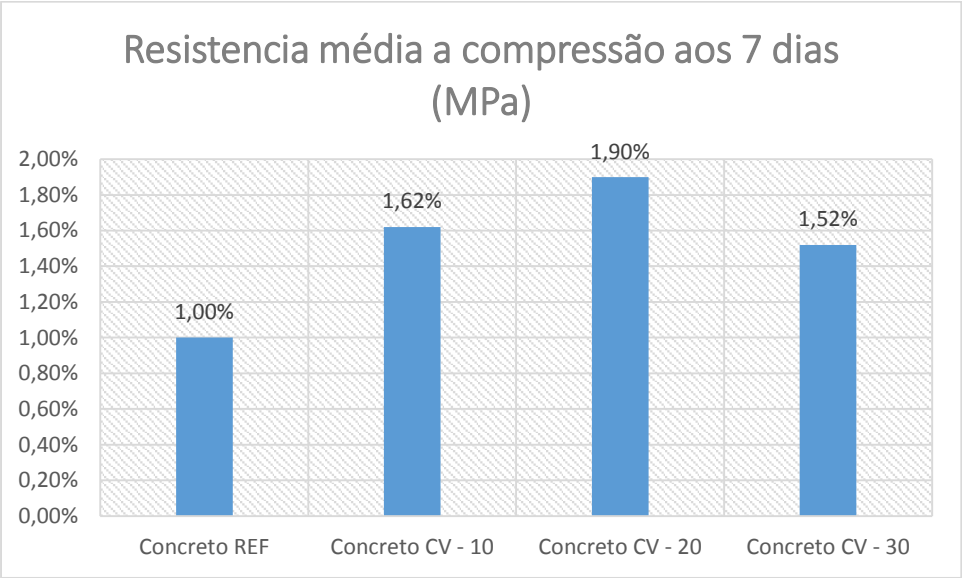


Gráfico 3 - Resistencia média a compressão aos 7 dias, em MPa.

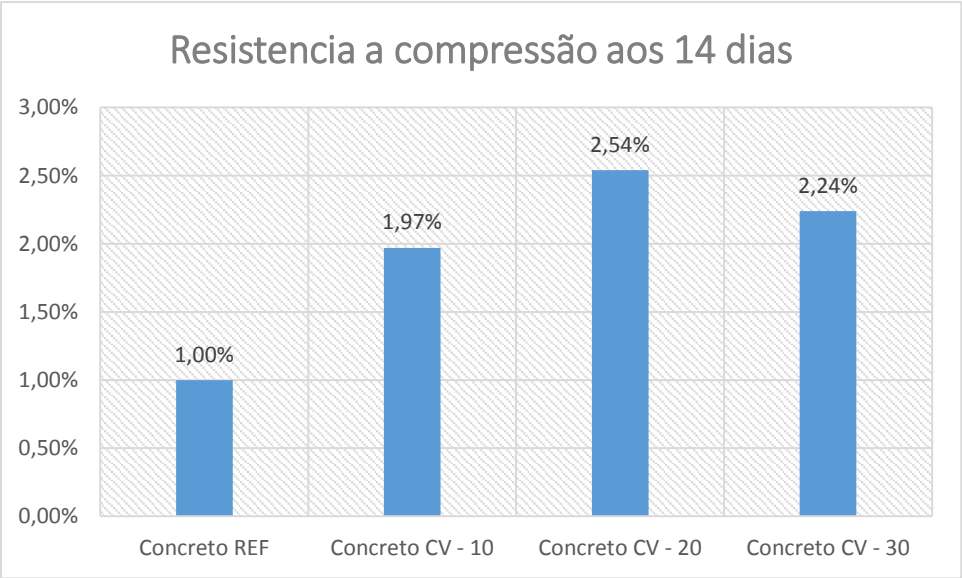


Gráfico 4 – Resistencia a compressão aos 14 dias, em MPa.

Para a formulação de adição, observou-se que aos 14 dias de idade, também houve um aumento na resistência ao se adicionar as cinzas volantes. Entretanto, houve uma ligeira perda de resistência a compressão na adição de 30%, assim como no concreto de adição com idade de 7 dias.

No concreto com as formulações de substituição de cimento pelas cinzas volantes, com idade de 7 dias, houve uma queda na resistência de 14%, na formulação de 20% de cinza volante com subtração de 5% de cimento. Outra queda, mais significativa

na formulação de 20% de cinza com subtração de 10% de cimento, cerca de 57% conforme é mostrado na tabela a seguir.

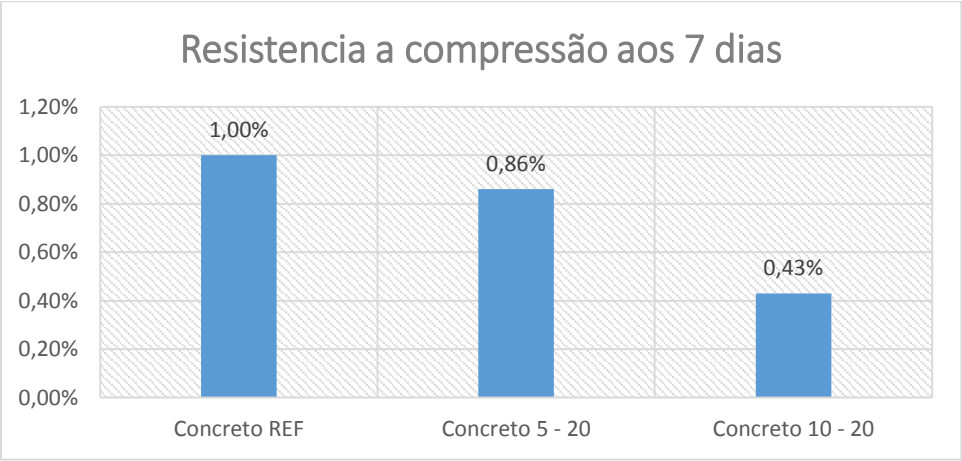


Gráfico 5 – Resistência média a compressão aos 7 dias.

Já no mesmo concreto com formulação de substituição com idade de 14 dias, houve um incremento de 9% na sua resistência na formulação de subtração de 5% de cimento com 20% de cinzas volantes.

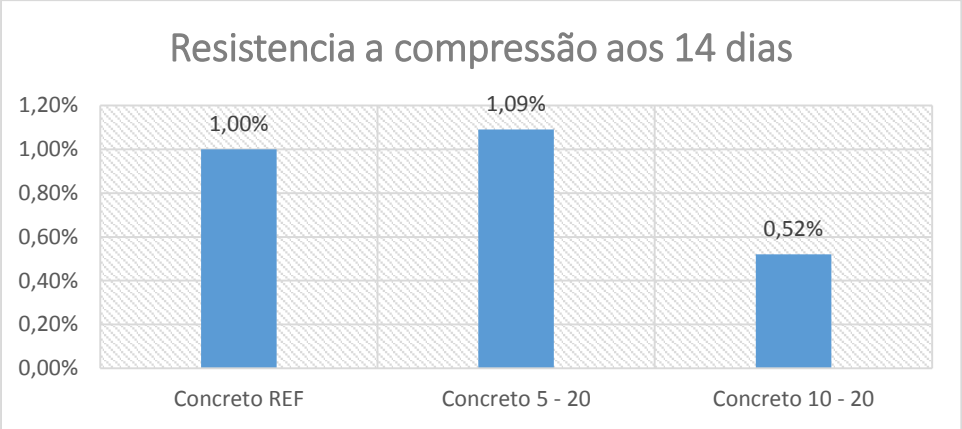


Gráfico 6 – Resistencia a compressão aos 14 dias

O comportamento de aumento da resistência do concreto com adição de cinzas volantes se assemelha com o comportamento do ensaio de compactação de solos, onde o aumento do teor de umidade aumenta a peso específico do material. Ao se adicionar as cinzas, há um preenchimento dos interstícios do concreto e uma atuação

como um micro agregado e como uma pozolana, melhorando a ligação interfacial entre o ligante e os agregados no concreto. [55,56]

Aruman, Ilangovan e James [4] observaram que as amostras de concreto com 20% de cinza volante e subtração de 5% de cimento mostraram melhora na resistência à compressão sobre a amostra de referência, na idade de 14 dias, fato que corrobora com os resultados deste trabalho.

Estudos similares, com substituições de cinza volante, observaram que com o aumento da substituição na formulação há uma diminuição da resistência a compressão.

O efeito da cinza volante na resistência à compressão pode ser devido ao efeito *filler* e ao efeito pozolânico. Nas primeiras idades, a maior contribuição para a resistência à compressão vem do efeito *filler*, com função de empacotamento e da criação de pontos para a nucleação dos produtos de hidratação ajudando na aceleração do processo de hidratação modificando a estrutura da pasta de cimento endurecida. [4]

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou-se a possibilidade de utilização de cinzas volantes como aglomerante na confecção de bloquetes, meios-fios e bancos de concreto. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que:

Para as adições de cinza volante, houve um aumento da resistência à compressão com o aumento do tempo de cura. Até 20% de adição, há um ótimo crescimento no valor da resistência em relação ao valor de referência.

Para as substituições de cimento pelas cinzas volantes, houve um aumento de 9% de resistência na formulação de 20% de cinzas com subtração de 5% de cimento.

Algumas formulações superaram significativamente a resistência do concreto de referência, tais quais as de adição de cinzas com 20%, com idade de 7 dias e 14 dias. Houve um incremento de 89% e 254% respectivamente, em relação à resistência de referência.

Em resumo, pode-se reduzir em até 5% no consumo de cimento para 20% de adição de cinzas no uso de concretos para artefatos como bloquetes, meios-fios e bancos de concreto.

.

REFERÊNCIAS

1. ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. **A versatilidade do cimento brasileiro**, 2009. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>. Acesso: 17 fev. 2014.

2. _____. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

3. AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**.1.ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p

4. ARUMUGAM, K.; ILANGOVAN, R.**;** JAMES, M. D. **A study on characterization and use of pond ash as fine aggregate in concrete. International Journal of civil and Structural Engineering,** v.2, p.466-474, 2011.

5. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201: **Guide to durable concrete**. Detroit,1991**.**

6. ARAUJO, Luís Eduardo dos Santos. **Crise Hídrica e Potencial Energético da Região Sudeste /** Rio de Janeiro: UFRJ **/** Escola Politécnica **/** Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

7. _____. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado:** Análises das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco. Porto Alegre, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. 148p.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738. **Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos**. Rio de Janeiro, 2003.

9. _____. NBR 5739. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

10. _____. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

11. _____. NBR 9479. **Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto**. Rio de Janeiro, 1993.

12. _____. NBR 11578. **Cimento Portland Composto.** Rio de Janeiro, 1991.

13. BAKKER, R.F.M. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of Steel in Concrete**: report of technical committee 60CSC RILEM. London: Chapman & Hall Ltda, 1988, p.22-55

14. BAUER, R.J.F. et. al. **Estudo da característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41,1999. Salvador-BA.Anais.Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM

15. CALLISTER Jr, W. **Ciência e engenharia dos materiais:** Uma introdução. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002, 587 p.

16. CHIES; SILVA; ZWONOK. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão: CIPECAL. In: ROCHA, J. **Utilização de resíduos na construção habitacional.** Porto Alegre: ANTAC, v.4 – Coletanea Habitare, 2003. P 218-239.

17. CHEN, S. W.; SCHNEIDER, U. **Microhardness and Mechanical Behavior of the Expanded Shale Concrete**. In: KATZ A et al. (ed.) The Interfacial Transition Zone in Cementitius Composites. Londres: E&FN SPON, 1998. p. 243-250.

18. CHRISTOPHER, L Page and Geogi Sergi. **Developments in Cathodic Protection Applied to Reinforced Concrete**. Journal of materials in civil engineering/february 2000.

19. CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolanicas. In: IBRACON **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, v.1, 2011. , Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

20. DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002

21. ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. **Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar**. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 7, p. 1368-1376, 2005.

22. FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 2ª ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006. 146 p.

23. GENTIL, V. **Corrosão**.4ª ed. Rio de. Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 2003.

24. GLASS, G.K., Buenfeld, N.R., **Corrosion Science**, V.39, pp. 1001, 1997

25. HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993.

26. HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. **Evaluation of mineral admixture on the viewpoint of chloride ion migration through mortar**. Cement & Concrete Composites, Great Britain: Elsevier Science, v.21, p. 443-448, 1999

27. HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **State-of-the Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments**. US Army Corps of Engineers - Engineer Research and Development Center. ERDC/SL TR-00-3. 2000. 116 p.

28. ISAIA, G.C. **Validade do ensaio de penetração de cloretos** (ASTM C 1202) **para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas**. In: International Congress On High-Performance Concrete, And Performance And Quality Of Concrete Structures, 1996. Florianópolis-RS. Proceedings. Florianópolis, 1996, p. 554-565.

29. ISAIA, G.C. **Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho:** um estudo de Surabilidade com Vista à Corrosão da Armadura. 1995. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1995.

30. LIMA, E. **Tratamento de estruturas em concreto aparente**. Revista Tèchne, n.11, jul/ago, p. 22-24, 1994.

31. MARTIN, Juan Fernando Matías. **Concreto:** ensino, pesquisa e realizações. Rio de Janeiro, RJ: IBRACON, 2005. 1v.

32. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008.

33. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 52 Agregado miúdo, determinação de massa específica e massa específica aparente. 1. Ed. [S.I.]:** [s.n], 2002.

34. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 248 – Agregados Determinação da composição granulométrica.** 1. Ed. [S.I.]: [s.n.], 2001

35. MENEZES, R. R.; H. S. Ferreira; G. A. Neves; H. C. Ferreira, **Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção** – revisão, cerâmica v.52 n.321, São Paulo, jan./mar. 2006

36. NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** Rio de Janeiro: COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ., 1975.

37. MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da Microestrutura do Concreto:** fases e interfaces: aspectos de durabilidade e de microfissuração. 1993. 138 f. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

38. NETO, C.S. **Agregados para concreto, Concreto:** Ensino, Pesquisa e Realizações”- IBRACON, 2005, São Paulo

39. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

40. PAULON, V. A. A **Microestrutura do Concreto Convencional**. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 1, p. 583-604.

41. PIRES, Arhur Martinez. **Impactos da crise hídrica na matriz energética brasileira: uma abordagem via teoria de portfólios, /**A.M. Pires – São Paulo, 2015.

42. POURBAIX M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. 1974. Nace International Cebelcor.644 p.

43. RAMANATHAN, L. V., **Corrosão e seu Controle**, Ed. Lemus, 1990.

44. REYNOLDS, T. D., **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering**, BC Engineering Division, Edition II, Boston, MA, 1982.

45. ROHDE. Contextos e Significados da palavra "Cinza". In : ROHDE **Cinzas de carvão.** Porto Alegre: [s.n], v.1, 2006.

46. ROHDE, G. M. et al. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil:** Aspectos Técnicos e Ambientais. Porto Alegre: CIENTEC, , v. 1, 2006.

47. _____. **Princípios da corrosão eletroquímica**. Cap. 2, Daniel Véras Ribeiro. (Org.). Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ed.Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2013, v. 1, p. 13-35.

48. SANTIAGO, Pauline Dulcinéia Mesquita**. Utilização de cinzas pesadas e volante de carvão mineral em concreto.** Dissertação de Mestrado. São Luís, 2016.

49. SCRIVENER, K. L. **The microstructure of concrete**. In: SKALNY, J. Materials Science of concrete I. Westerville: The American Ceramic Society. p. 127-162, 1989.

50. _____. **The Development of Microstructure During the Hydration of Cement**, PhD Thesis, University of London, (1984), referida em Taylor H.F.W., Cement Chemistry, Thomas Telford, p.194, 2ª Ed. (1997)

51. SILVA, F. G.; LIBORIO, J. B. L. **A Study of Steel Bar Reinforcement Corrosion in Concretes with SF and SRH Using Electrochemical Impedance Spectroscopy**. Materials Research, São Carlos, v. 9, n. 2, p. 209-215, 2006.

52. SILVA, F.G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, 2006.

53. SILVA, N. I. W. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. Ceramica,** 45, 1999. 184-187.

54. SMITH, F.S. **Princípios de ciência e engenharia dos materiais**. Editora McGraw-Hill, Portugal, 1996, 892 p.

55. SONG, G. **Equivalent circuit model for SAC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. Cement and Concrete Research**, v.30, n 11, p.1723-1730, 2003.

56. TOPCU, I. B.; BILIR T. **Effect of bottom ash as fine aggregate on shrinkage cracking of mortars. ACI materials journal** Part 2. Experimental evaluation. Cement and Concrete Research, USA: Pergamon, v.107, p. 48-56, 2010.

57. TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**.2nd Edition. Thomas Telford Edition, 1997.

58. TUUTTI, K. C**orrosion of steel in concrete**. Stokholm, Swedish Cement and Concrete. Research Institute, 1982. 469p

59. UNGARO, D. A.; SILVA, M. G.Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de. **Química Nova,** v.25, 2002.

60. VAN DER TOORN, A. **The Maintenance of Civil Engineering Structures.** Heron. v.39, nº 4, 1992. p. 3-34

61. VIRTANEN, S. **Electrochemical Theory** – Corrosion. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, p. 56–63, 2009

62. WARNECK, P. **Chemistry of the natural atmosphere**. Academic Press, Inc. New York, 1988.

63. WASSERMAN, R.; BENTUR, A. **Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength**. Cement and Concrete Composites, v. 18, p. 67-76, 1996.

64. YAZIGI, W. A **Técnica de Edificar**. PINI. 2007.

65. ZWONOK, Oleg, SILVA, Neli Iloni W., CHIES, Fradique; SILVA.. **Identificação dos usos possíveis para as cinzas carboníferas de termelétricas brasileiras.** Porto Alegre: CIENTEC, 1996.

APENDICE A – Composição das cinzas volantes e pH

Tabela A.1 – Composição química das cinzas e pH

Composição Química das Cinzas Volantes		
Elemento	Símbolo	Concentração (mg/L)
Alumínio	Al	55,4686
Cálcio	Ca	17,2839
Cádmio	Cd	0,01717
Cobalto	Co	0,38185
Cobre	Cu	0,18866
Ferro	Fe	151,155
Háfnio	Hf	0,00883
Potássio	K	13,9527
Magnésio	Mg	21,2672
Manganes	Mn	1,56056
Molibdenio	Mo	0,1223
Sódio	Na	16,56
Níquel	Ni	0,23078
Fósforo	P	5,18761
Chumbo	Pb	0,73199
Zinco	Zn	0,51168
pH	8,06	

APENDICE B – Valores absolutos das resistências a compressão axial da formulação de adição

Formulações Concreto REF (referencia)	Resistencia aos 7 dias (MPa)	Resistencia aos 14 dias (MPa)
CP - 01	5,35	-
CP - 02	4,45	-
CP - 03	5,09	-
CP - 04	-	5,16
CP - 05	-	5,50
CP - 06	-	5,46
Formulações Concreto CV - 10	Resistencia aos 7 dias	Resistencia aos 14 dias
CP - 07	7,33	-
CP - 08	7,20	-
CP - 09	8,71	-
CP - 10	-	9,45
CP - 11	-	10,85
CP - 12	-	9,55
Formulações Concreto CV - 20	Resistencia aos 7 dias	Resistencia aos 14 dias
CP - 13	10,12	-
CP - 14	8,70	-
CP - 15	8,89	-
CP - 16	-	14
CP - 17	-	12,68
CP - 18	-	12,37
Formulações Concreto CV - 30	Resistencia aos 7 dias	Resistencia aos 14 dias
CP - 19	7,57	-
CP - 20	8,17	-
CP - 21	7,37	-
CP - 22	-	12,33
CP - 23	-	12,36
CP - 24	-	11,80

Tabela B.1 – Valores absolutos de resistências na adição

Tabela B.2 – Valores absolutos de resistências na substituição

Formulações Concreto REF (referencia)	Resistencia aos 7 dias (MPa)	Resistencia aos 14 dias (MPa)
CP - 01	14,27	-
CP - 02	14,75	-
CP - 03	13,71	-
CP - 04	-	16,02
CP - 05	-	16,28
CP - 06	-	15,53
Formulações Concreto 5 - 20	Resistencia aos 7 dias	Resistencia aos 14 dias
CP - 07	12,80	-
CP - 08	12,48	-
CP - 09	10,85	-
CP - 10	-	16,20
CP - 11	-	17,80
CP - 12	-	16,46
Formulações Concreto 10 - 20	Resistencia aos 7 dias	Resistencia aos 14 dias
CP - 13	5,75	-
CP - 14	6,38	-
CP - 15	6,17	-
CP - 16	-	7,24
CP - 17	-	8,61
CP - 18	-	7,64

APENDICE C – Teste de Tukey para formulações de adição aos 7 dias

Figura C.1 – Teste de Tukey para formulações de adição aos 7 dias.

```
==================================================================
ASSISTAT Versão 7.7 pt (2017)  -  Homepage http://www.assistat.com
Por Francisco de A. S. e Silva - UFCG-Brasil - Atualiz. 01/03/2017
               EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

                        QUADRO DE ANÁLISE
------------------------------------------------------------------
FV             GL          SQ              QM            F
------------------------------------------------------------------
Tratamentos     3         28.56676         9.52225      22.6406 **
Resíduo         8          3.36467         0.42058
------------------------------------------------------------------
Total          11         31.93143
------------------------------------------------------------------
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
ns não significativo (p >= .05)

    GL           GLR          F-crit       F            p
    3            8            7.591        22.6406      0.0002
                       MÉDIAS E MEDIDAS
                     Médias de tratamento
                     ----------------------
                        1       4.96333  b
                        2       7.74667 a
                        3       9.23667 a
                        4       7.70333 a
                     ----------------------
                       dms =       1.69615

    MG = 7.41250                                   CV% = 8.75
                     Ponto médio = 7.28500

          As médias seguidas pela mesma letra não diferem
          estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste
             de Tukey ao nível de 5% de probabilidade
                Normalidade dos dados (alfa = 5%)
           ---------------------------------------------
           Teste (Estatística)  Valor   p-valor  Normal
           Shapiro-Wilk (W)    0.93971  0.49429    Sim
           ---------------------------------------------
                              DADOS
                        -------------------
                         5.35   4.45   5.09
                         7.33   7.20   8.71
                        10.12   8.70   8.89
                         7.57   8.17   7.37
                        -------------------
```

APENDICE D – Teste de Tukey para formulações de adição aos 14 dias

Figura D.1 – Teste de Tukey para formulações de adição aos 14 dias.

```
=====================================================================
ASSISTAT Versão 7.7 pt (2017)  -  Homepage http://www.assistat.com
Por Francisco de A. S. e Silva - UFCG-Brasil - Atualiz. 01/03/2017
=====================================================================
Arquivo testedetukey_14dias.txt  Data 30/05/2017  Hora 09:42:12

               EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

                        QUADRO DE ANÁLISE
---------------------------------------------------------------------
FV             GL          SQ              QM            F
---------------------------------------------------------------------
Tratamentos     3        105.37649       35.12550      94.1072 **
Resíduo         8          2.98600        0.37325
---------------------------------------------------------------------
Total          11        108.36249
---------------------------------------------------------------------
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
ns não significativo (p >= .05)
    GL           GLR          F-crit       F            p
    3            8            7.591        94.1072      <.0001
                      MÉDIAS E MEDIDAS
                    Médias de tratamento
                   ----------------------
                      1       5.37333   c
                      2       9.95000  b
                      3      13.01667 a
                      4      12.16333 a
                   ----------------------
                     dms =       1.59786
    MG = 10.12583                                  CV% = 6.03
                   Ponto médio = 9.58000
         As médias seguidas pela mesma letra não diferem
         estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste
            de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

              Normalidade dos dados (alfa = 5%)
          ---------------------------------------------
          Teste (Estatística)  Valor   p-valor  Normal
          Shapiro-Wilk (W)    0.85046  0.03719    Não
          ---------------------------------------------
                              DADOS
                     -------------------
                      5.16   5.50   5.46
                      9.45  10.85   9.55
                     14.00  12.68  12.37
                     12.33  12.36  11.80
                     -------------------
```

APENDICE E – Teste de normalidade para formulações de adição aos 7 dias

Figura E.1 – Teste de normalidade para formulações de adição aos 7 dias.

```
==================================================
ASSISTAT - NORMALIDADE E ESTATÍSTICA DESCRITIVA
            http://www.assistat.com
==================================================
       Data: 30/05/2017   Hora: 09:32:53

            NORMALIDADE (alfa = 5%)

-------------------------------------------------------------
Teste (Estatística)      Valor    Vcrit   p-valor   Normal
-------------------------------------------------------------
Kolmogorov-Smirnov (D)  0.20038  0.24193  p > .15    Sim
Cramér-von Mises (W2)   0.06658  0.12096  p > .15    Sim
Anderson-Darling (A2)   0.38547  0.67861  p > .15    Sim
Kuiper (V)              0.33734  0.39698  p > .15    Sim
Watson (U2)             0.06408  0.11136  p > .15    Sim
Lilliefors (D)          0.13696  0.24200  p > .15    Sim
Shapiro-Wilk (W)        0.93971     -     0.49429    Sim
-------------------------------------------------------------

              ESTATÍSTICA DESCRITIVA

          Número de dados          =  12
          Soma dos dados           =  88.95
          Menor valor (min)        =  4.45
          Maior valor (max)        =  10.12
          Aplitude (max - min)     =  5.67
          Ponto médio              =  7.28500
          Média aritmética(M)      =  7.41250
          Lim.conf.inf.da M(95%)   =  6.28230
          Lim.conf.sup.da M(95%)   =  8.54270
          Mediana                  =  7.47
          Moda                     =  Não há moda
          Desvio médio             =  1.28083
          Desvio padrão(para N-1)  =  1.70378
          Desvio padrão(para N)    =  1.63124
          Variância(para N-1)      =  2.90286
          Variância(para N)        =  2.66095
          Coef.Variação(para N-1)  =  22.98519
          Coef.Variação(para N)    =  22.00664
          Coef.de assimetria       = -.42971
          Coef.de curtose          = -.50593

          (para N-1)=Amostra (para N)=População

Para cálculo da estatística (W) de Shapiro-Wilk e da sua
probabilidade (p-valor), o Assistat utiliza o Algorithm
AS R94, Applied Statistics (1995), vol.44, no.4, 547-551
```

APENDICE F – Teste de normalidade para formulações de adição aos 14 dias

Figura F.1 – Teste de normalidade para formulações de adição aos 14 dias.

```
=================================================
ASSISTAT - NORMALIDADE E ESTATÍSTICA DESCRITIVA
            http://www.assistat.com
=================================================
       Data: 30/05/2017   Hora: 09:41:01

            NORMALIDADE (alfa = 5%)

-------------------------------------------------------------
Teste (Estatística)      Valor    Vcrit   p-valor   Normal
-------------------------------------------------------------
Kolmogorov-Smirnov (D)  0.20312  0.24193  p > .15    Sim
Cramér-von Mises (W2)   0.12395  0.12096  p < .05    Não
Anderson-Darling (A2)   0.78750  0.67861  p < .05    Não
Kuiper (V)              0.38285  0.39698  p > .05    Sim
Watson (U2)             0.11651  0.11136  p < .05    Não
Lilliefors (D)          0.17973  0.24200  p > .15    Sim
Shapiro-Wilk (W)        0.85046     -     0.03719    Não
-------------------------------------------------------------

              ESTATÍSTICA DESCRITIVA

          Número de dados          =  12
          Soma dos dados           =  121.51
          Menor valor (min)        =  5.16
          Maior valor (max)        =  14
          Aplitude (max - min)     =  8.84
          Ponto médio              =  9.58000
          Média aritmética(M)      =  10.12583
          Lim.conf.inf.da M(95%)   =  8.04389
          Lim.conf.sup.da M(95%)   =  12.20778
          Mediana                  =  11.325
          Moda                     =  Não há moda
          Desvio médio             =  2.58487
          Desvio padrão(para N-1)  =  3.13865
          Desvio padrão(para N)    =  3.00503
          Variância(para N-1)      =  9.85111
          Variância(para N)        =  9.03019
          Coef.Variação(para N-1)  =  30.99644
          Coef.Variação(para N)    =  29.67683
          Coef.de assimetria       = -.74256
          Coef.de curtose          = -.96438

          (para N-1)=Amostra (para N)=População

Para cálculo da estatística (W) de Shapiro-Wilk e da sua
probabilidade (p-valor), o Assistat utiliza o Algorithm
AS R94, Applied Statistics (1995), vol.44, no.4, 547-551
```

APENDICE G – Teste de Tukey para formulações de substituição aos 7 dias

Figura G.1 – Teste de Tukey para formulações de substituições aos 7 dias

```
=================================================================
ASSISTAT Versão 7.7 pt (2017)  -  Homepage http://www.assistat.com
Por Francisco de A. S. e Silva - UFCG-Brasil - Atualiz. 01/03/2017
=================================================================
Arquivo substituicao_7dias.txt  Data 16/06/2017  Hora 11:47:56

               EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

                        QUADRO DE ANÁLISE
-----------------------------------------------------------------
FV             GL          SQ              QM            F
-----------------------------------------------------------------
Tratamentos     2        106.47709       53.23854     108.8377 **
Resíduo         6          2.93493        0.48916
-----------------------------------------------------------------
Total           8        109.41202
-----------------------------------------------------------------
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
ns não significativo (p >= .05)

    GL           GLR          F-crit       F            p
    2            6            10.9248      108.8377     <.0001

                        MÉDIAS E MEDIDAS

                     Médias de tratamento
                    ----------------------
                       1      14.24333 a
                       2      12.04333  b
                       3       6.10000   c
                    ----------------------
                      dms =       1.75248
    MG = 10.79556                                  CV% = 6.48
                    Ponto médio = 10.25000

          As médias seguidas pela mesma letra não diferem
          estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste
             de Tukey ao nível de 5% de probabilidade
                Normalidade dos dados (alfa = 5%)
           ---------------------------------------------
           Teste (Estatística)  Valor    p-valor  Normal
           Shapiro-Wilk (W)    0.83578  0.05183    Sim
           ---------------------------------------------
                              DADOS
                     -------------------
                     14.27  14.75  13.71
                     12.80  12.48  10.85
                      5.75   6.38   6.17
```

APENDICE H – Teste de Tukey para formulações de substituição aos 14 dias

Figura H.1 – Teste de Tukey para formulações de substituição aos 14 dias.

```
==================================================================
ASSISTAT Versão 7.7 pt (2017)  -  Homepage http://www.assistat.com
Por Francisco de A. S. e Silva - UFCG-Brasil - Atualiz. 01/03/2017
==================================================================
Arquivo substituicao_14dias.txt  Data 16/06/2017  Hora 11:49:55

               EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

                        QUADRO DE ANÁLISE
------------------------------------------------------------------
FV              GL          SQ              QM            F
------------------------------------------------------------------
Tratamentos      2        147.41482        73.70741     160.4040 **
Resíduo          6          2.75707         0.45951
------------------------------------------------------------------
Total            8        150.17189
------------------------------------------------------------------
** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
ns não significativo (p >= .05)

    GL           GLR          F-crit       F            p
    2            6            10.9248      160.404      <.0001

                      MÉDIAS E MEDIDAS
                    Médias de tratamento
                   ----------------------
                      1      15.94333 a
                      2      16.82000 a
                      3       7.83000  b
                   ----------------------
                     dms =       1.69855
    MG = 13.53111                                  CV% = 5.01
                   Ponto médio = 12.52000
         As médias seguidas pela mesma letra não diferem
         estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste
            de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

              Normalidade dos dados (alfa = 5%)
          ---------------------------------------------
          Teste (Estatística)  Valor   p-valor  Normal
          Shapiro-Wilk (W)    0.75671  0.00649    Não
          ---------------------------------------------
                              DADOS
                        -------------------
                        16.02  16.28  15.53
                        16.20  17.80  16.46
                         7.24   8.61   7.64
                        -------------------
```