

Anderson Luiz Kreuz

**UTILIZAÇÃO DE CINZAS PESADAS DE TERMELÉTRICAS
NA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO E AREIA NA CONFECÇÃO
DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Florianópolis

Mar/2002

UTILIZAÇÃO DE CINZAS PESADAS DE TERMELÉTRICAS NA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO E AREIA NA CONFECÇÃO DE CONCRETOS

Anderson Luiz Kreuz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração:
Construção Civil

Orientador:
Prof. Dr. Malik Cheriaf

Florianópolis – Brasil
2002

AGRADECIMENTOS

Registro aqui meus agradecimentos a todos que me apoiaram, tanto intelectualmente, fisicamente como emocionalmente nesta jornada.

Com esse sentido amplo, quero agradecer àqueles que, além do aspecto técnico, incentivaram meu espírito, em especial:

ao Prof. Malik Cheriaf e à Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha pela orientação deste trabalho e amizade;

aos professores examinadores, pela dedicação ao exame deste trabalho;

a todos os colegas do Grupo ValoRes como Flora, João Paulo, Caroline, pela colaboração, em especial ao Leonardo pela ajuda indispensável. A Guilherme Ribeiro pela ajuda no trabalho de laboratório.

aos meus pais, Vilma Beduschi Kreuz e André Jacob Kreuz, pelo afeto, confiança e principalmente, pelo apoio à busca de uma boa educação,

aos meus irmãos Vandrei, Andiará e Madalise, pelo carinho e incentivo;

à minha Noiva, Larissa Wilke, pela dedicação, tolerância, paciência e amor;

Agradeço também a empresa Gerasul pela doação das cinzas deste estudo, bem como pelo auxílio financeiro que permitiu a realização dos ensaios, bem como às empresas Protenph, Saibrita e Cassol pelas doações de areia, brita e cimento.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Apresentação do Tema	1
1.2	Objetivos da Pesquisa	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Hipóteses	3
1.3.1	Hipótese geral	3
1.3.2	Hipóteses específicas	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1.1	Tipos de Resíduos Provenientes da Queima do Carvão em Termelétricas	4
2.2	Breve Histórico da Produção de Cinzas	5
2.3	Propriedades das Cinzas de Termelétricas	6
2.3.1	Análise Química e Classificação das Cinzas de Carvão	6
2.3.2	Atividade Pozolânica	7
2.3.3	Densidade das Cinzas	10
2.4	Uso das Cinzas de Carvão como Matéria-prima	11
2.4.1	Histórico	11
2.4.2	Propriedades de Concretos com Cinza	12
2.4.3	Propriedades dos Concretos no Estado Fresco	18
2.4.3.1	Trabalhabilidade	18

2.4.3.2	Exsudação	19
2.4.4	Efeitos da Absorção dos Agregados no Concreto.....	19
2.4.5	Grau de Hidratação do Cimento e Ganho de Resistência dos Concretos com Cinza no Estado Endurecido	20
2.4.6	Durabilidade.....	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Estudo Piloto com Argamassa	23
3.1.1	Materiais utilizados	23
3.1.2	Dosagens e Produção das Argamassas.....	24
3.1.3	Ensaio de Consistência “Flow Table”	25
3.1.4	Moldagem dos Corpos de Prova e Densidade no Estado Fresco	25
3.1.5	Ensaio de Resistência à Compressão.....	26
3.2	Produção dos Concretos.....	28
3.2.1	Caracterização dos Materiais	28
3.2.1.1	Massa Específica dos Agregados.....	29
3.2.1.2	Granulometria	29
3.2.1.3	Material pulverulento.....	29
3.2.1.4	Massa Unitária e Inchamento.....	29
3.2.1.5	Determinação do Índice de Atividade Pozolânica da Cinza Pesada ...	30
3.2.1.6	Perda de Massa ao Fogo.....	30
3.2.1.7	Determinação da Área Específica de Material em Pó.....	30
3.2.1.8	Capacidade de Retenção d’água pela Cinza Pesada	30

3.2.1.9	Análise Térmica Diferencial da Cinza Pesada.....	31
3.2.2	Definições e Considerações Gerais para as Substituições	31
3.2.3	Escolha dos Tipos de Cimento a Serem Utilizados	33
3.2.4	Método de Dosagem dos Concretos.....	33
3.2.5	Mistura dos materiais	35
3.2.6	Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	35
3.2.7	Avaliação dos Concretos no Estado Fresco	36
3.2.7.1	Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone	36
3.2.7.2	Ensaio de Perda de abatimento	36
3.2.7.3	Ensaio de Massa Específica dos Concretos no Estado Fresco.....	36
3.2.8	Avaliação dos Concretos no Estado Endurecido	37
3.2.8.1	Ensaio de Resistência à compressão.....	37
3.2.8.2	Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	38
3.2.9	Determinação do Consumo de Cimento	39
3.2.10	Confecção dos Diagramas de Dosagem Segundo Método do IPT/EPUSP .	40
3.2.11	Análise da Durabilidade dos Concretos	41
3.2.11.1	Ensaio de Permeabilidade	41
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
4.1	Caracterização dos Materiais	42
4.1.1	Cimento	42
4.1.2	Cinza Pesada	43

4.1.2.1	Área Específica da Cinza Pesada.....	43
4.1.2.2	Análise Térmica Diferencial - ATD.....	44
4.1.2.3	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.....	44
4.1.2.4	Determinação do Índice de Atividade Pozolânica da Cinza Pesada...	45
4.1.2.5	Perda de Massa ao Fogo e Massa Específica.....	45
4.1.2.6	Determinação do “Material Pulverulento” presente na cinza pesada .	46
4.1.2.7	Caracterização Granulométrica da Cinza Pesada.....	46
4.1.2.8	Capacidade de Retenção d’água pela Cinza Pesada	48
4.1.3	Areia e Brita	49
4.1.3.1	Caracterização Granulométrica da Areia	49
4.1.3.2	Caracterização Granulométrica da Brita	50
4.1.3.3	Massa Específica da Areia e Brita	51
4.1.3.4	Material Pulverulento.....	51
4.1.3.5	Índice de Forma dos Agregados Graúdos	51
4.1.3.6	Teor de Matéria Orgânica na Areia.....	52
4.1.4	Inchamento da Areia e da Cinza Pesada	52
4.1.5	Massa Unitária	54
4.1.6	Análise das Composições Granulométricas de Areia e Cinza Pesada	54
4.2	Concreto no Estado Fresco	56
4.2.1	Relação água/cimento e Trabalhabilidade	56
4.2.2	Ensaio de massa específica dos concretos	62

4.2.3	Verificação da Perda de Abatimento.....	64
4.3	Concreto no Estado Endurecido.....	68
4.3.1	Coloração	68
4.3.2	Resultados da Resistência à Compressão dos Concretos.....	69
4.3.2.1	Concreto com Substituição da Areia pela Cinza pesada.....	69
4.3.2.2	Concreto com Substituição do Cimento pela Cinza Pesada	73
4.3.3	Construção de Curvas de Regressão	76
4.3.3.1	Curvas de Regressão para Concretos tipo AREIA/CZP	76
4.3.4	Correlações.....	80
4.3.5	Construção dos Diagramas de Dosagem.....	83
4.3.5.1	Diagramas de Dosagem	84
4.4	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	87
4.5	Custos dos Insumos para a Produção de Concretos.....	91
4.5.1	Consumo de Cimento para a Produção de Concreto com Resistência Média, fcj=32 MPa.....	91
4.5.2	Relação entre a Resistência à Compressão e os Custos Unitários	94
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5.1	Conclusões	97
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ensaio de consistência utilizando a mesa do “Flow Table”.....	25
Figura 3.2 – Resultados dos ensaios de massa específica em função dos diferentes teores de substituição.....	26
Figura 3.3 – Evolução da resistência à compressão das argamassas.	27
Figura 3.4 – Seqüência de tratamento de faces para o rompimento dos corpos de prova. a) Serragem b) Capeamento.....	38
Figura 3.5– Esquema montado para o ensaio de absorção de água por capilaridade.	39
Figura 4.1 – Coleta da cinza pesada empregada no estudo.....	43
Figura 4.2 - Análise Térmica Diferencial da cinza pesada	44
Figura 4.3 – MEV da cinza pesada utilizada nos concretos. a) logo após a coleta na bacia b) armazenado durante 1 ano a uma umidade em torno de 45%.....	45
Figura 4.4 – Curvas granulométricas da cinza pesada.	47
Figura 4.5 – Retenção de água em relação à umidade presente na amostra.	48
Figura 4.6 – Curvas granulométricas da areia.....	49
Figura 4.7 – Curvas granulométricas do agregado graúdo.	50
Figura 4.8 – Curva de inchamento da areia utilizada na produção dos concretos	52
Figura 4.9 – Curva de inchamento da cinza pesada utilizada na confecção dos concretos	53
Figura 4.10 –Distribuição das diferentes composições granulométricas juntamente com os limites prescritos pela ASTM C 33 (1990).....	56
Figura 4.11 – Comparação visual dos diferentes concretos AREIA/CZP, com cimento CPI-S e mesmo slump: a) 10% substituição b) 25% substituição c) 50% substituição..	58

Figura 4.12 – Comparação visual dos diferentes concretos AREIA/CZP, com cimento ARI e mesmo slump: a) 10% substituição b) 25% substituição c) 50% substituição.....	58
Figura 4.13 – Comparação visual dos diferentes concretos CIM/CZP com teores de 30% de substituição a) Com cimento CPI-S b) Com cimento ARI	62
Figura 4.14 – Massa específica dos concretos no estado fresco com substituição da areia pela cinza pesada.....	63
Figura 4.15 – Massa específica dos concretos no estado fresco com substituição do cimento pela cinza pesada.....	63
Figura 4.16 – Evolução da perda de abatimento para concretos com AREIA/CZP	66
Figura 4.17 – Evolução da perda de abatimento para concretos com CIM/CZP.....	67
Figura 4.18 – Aspecto dos diferentes concretos: referência e com adição de cinza.....	69
Figura 4.19 – Seqüência de rompimento dos corpos de prova: a) Corpo de prova sendo carregado b) Corpo de prova após o rompimento.....	69
Figura 4.20 - Comparativo entre as resistências à compressão dos diferentes concretos AREIA/CZP.....	71
Figura 4.21 - Comparativo entre as resistências à compressão dos diferentes concretos CIM/CZP.....	75
Figura 4.22 – Evolução da resistência à compressão dos concretos AREIA/CZP utilizando cimento CPIS	77
Figura 4.23 – Evolução da resistência à compressão dos concretos AREIA/CZP utilizando cimento ARI.....	77
Figura 4.24 – Evolução da resistência à compressão dos concretos CIM/CZP utilizando cimento CPIS.....	79
Figura 4.25 – Evolução da resistência à compressão dos concretos CIM/CZP utilizando cimento ARI.....	79

Figura 4.26 – Correlações para as resistências à compressão dos concretos Areia/CZP	81
Figura 4.27 – Correlações para as resistências à compressão dos concretos CIM/CZP.	83
Figura 4.28 - Diagrama de dosagem para os diferentes concretos AREIA/CZP utilizando cimento CPIS.	84
Figura 4.29 - Diagrama de dosagem para os diferentes concretos AREIA/CZP utilizando cimento ARI.	84
Figura 4.30 - Diagrama de dosagem para os concretos CIM/CZP utilizando cimento CPIS.	86
Figura 4.31 - Diagrama de dosagem para os concretos CIM/CZP com cimento ARI.	86
Figura 4.32 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos AREIA/CZP com cimento CPIS aos 210 dias.	88
Figura 4.33 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos AREIA/CZP com cimento ARI aos 210 dias.	88
Figura 4.34 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos CIM/CZP com cimento CPIS aos 210 dias.	90
Figura 4.35 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos CIM/CZP com cimento ARI aos 210 dias.	91
Figura 4.36 - Histogramas com o consumo de cimento para o concreto AREIA/CZP para R_c de 32 MPa.	92
Figura 4.37 - Histogramas com o consumo de cimento para os concretos CIM/CZP.	93
Figura 4.38 – Relação da resistência à compressão aos 28 dias os custos dos concretos AREIA/CZP.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Constituintes de amostras de cinzas de termelétricas	7
Tabela 3.1 – Valores de massa específica da areia normalizada e da cinza pesada.....	24
Tabela 3.2 – Análise química da cinza pesada.....	24
Tabela 3.3 - Porcentagens de resistências à compressão das argamassas com cinza pesada em relação à argamassa de referência.	28
Tabela 3.4 – Concreto com substituição da areia pela cinza pesada.....	35
Tabela 3.5 – Concreto com substituição do cimento pela cinza pesada.	35
Tabela 4.1 – Características dos cimentos empregados no estudo	42
Tabela 4.2 – Valores de perda ao fogo e massa específica para a cinza pesada.	45
Tabela 4.3 – Composição granulométrica da cinza pesada pelo processo de peneiramento a seco.....	46
Tabela 4.4 – Composição granulométrica da cinza pesada pelo processo de peneiramento úmido.....	47
Tabela 4.5 – Composição granulométrica da areia na produção dos concretos	49
Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado na produção de concretos.	50
Tabela 4.7 – Valores médios de massa específica da areia e agregado graúdo.	51
Tabela 4.8 – Teor de material pulverulento dos agregados.	51
Tabela 4.9 – Umidade crítica e coeficiente de inchamento médio da cinza pesada e da areia.....	53
Tabela 4.10 – Valores da massa unitária da brita e da areia.....	54
Tabela 4.11 – Composições granulométricas e limites segundo NBR 7211	55

Tabela 4.12 - Módulo de finura e classificação granulométrica das diferentes composições segundo a NBR 7211 (1983).....	55
Tabela 4.13 – Traços em massa utilizados nos concretos AREIA/CZP.....	59
Tabela 4.14 – Teor de argamassa, abatimento e relação a/c dos concretos AREIA/CZP moldados.....	59
Tabela 4.15 – Traços em massa utilizados nos concretos AREIA/CZP.....	60
Tabela 4.16 – Teor de argamassa ideal (α_i), abatimento, relação água/cimento e relação água/(cimento+cinza pesada) dos concretos CIM/CZP moldados.....	61
Tabela 4.17 – Valores da massa específica dos concretos com cinza pesada.....	62
Tabela 4.18 – Valores da massa específica dos concretos elaborados com a substituição parcial do cimento pela cinza pesada.....	63
Tabela 4.19 – Valores de perda de abatimento para concretos AREIA/CZP traço m=5,0.....	65
Tabela 4.20 – Valores de perda de abatimento para concretos CIM/CZP, com traço m=5,0.....	65
Tabela 4.21 – Valores de resistência média dos concretos do tipo AREIA/CZP.....	70
Tabela 4.22 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos AREIA/CZP com cimento CPIS em relação aos de referência.....	73
Tabela 4.23 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos AREIA/CZP com cimento ARI em relação aos de referência.....	73
Tabela 4.24 – Valores de resistência média dos concretos tipo CIM/CZP.....	74
Tabela 4.25 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos CIM/CZP com cimento CPIS em relação aos de referência.....	76
Tabela 4.26 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos CIM/CZP com cimento ARI em relação aos de referência.....	76

Tabela 4.27 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos AREIA/CZP com cimento CPIS	78
Tabela 4.28 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos AREIA/CZP com cimento ARI.....	78
Tabela 4.29 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos CIM/CZP com cimento CPIS.....	80
Tabela 4.30 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos CIM/CZP com cimento ARI	80
Tabela 4.31 - Coeficiente de absorção capilar para concretos AREIA/CZP e concretos CIM/CZP.....	89
Tabela 4.32 – Quantidades de cimento para a produção de um concreto do tipo AREIA/CZP com resistência média de 32 MPa aos 28 dias.	92
Tabela 4.33 – Quantidades de cimento e cimentantes para a produção de um concreto do tipo CIM/CZP com resistência média de 32 MPa aos 28 dias.....	93
Tabela 4.34 – Preço médio dos insumos.....	94
Tabela 4.35 - Custo para concretos com substituição da areia pela cinza pesada.	94
Tabela 4.36 – Custo para concretos com substituição do cimento pela cinza pesada. ...	95
Tabela 5.1 - Resumo da influência da cinza pesada nos concretos, em relação aos de referência.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- α_i - Porcentagem de argamassa ideal;
- a/c - Relação água/cimento;
- AREIA/CZP - Substituição de parte da areia por Cinza Pesada;
- CIM/CZP - Substituição de parte do cimento por Cinza Pesada;
- CPIS, CP I-S - Cimento Portland Comum com adição;
- CP V ou ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- CZP - Cinza Pesada;
- CZV - Cinza volante;
- fcj - resistência à compressão a idade de j dias;
- CPI S 10% - Concreto confeccionado com CPI S; tendo 10% de substituição de material, areia ou cimento pela CZP;
- ARI 10% - Concreto confeccionado com cimento ARI, tendo 10% de substituição de material, areia ou cimento pela CZP;
- GERASUL - Centrais Geradoras do Sul do Brasil S.A;
- m - Traço do concreto (kg de agregado total por kg de cimento);
- MPa - Mega Pascal;
- NBR - Norma Brasileira;
- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina;
- ValoRes - Grupo de Valorização de Resíduos na Construção Civil;

RESUMO

O setor industrial no Brasil vem crescendo mais a cada dia, e com este crescimento estão sendo produzidas maiores quantidades de subprodutos ou rejeitos industriais, tornando o custo de tratamento e/ou destinação cada vez maiores.

O aproveitamento de resíduos industriais em materiais para a construção civil tem mostrado através de pesquisas, boas perspectivas para utilização com viabilidade técnica e econômica.

Objetivando ajudar na busca de novas aplicações para os subprodutos industriais, oriundos da queima de carvão mineral, realizou-se um estudo em concretos com diferentes consumos de cimento, diferentes quantidades de substituição de agregados naturais por cinza pesada, diferentes quantidades de substituição do cimento por cinza pesada em dosagens com diferentes tipos de cimentos Portland.

Para se fazer uma comparação mais fidedigna entre os concretos, estes foram confeccionados para um mesmo abatimento de tronco de cone (trabalhabilidade). Quando avaliada a perda de abatimento, os concretos contendo cinza pesada se mostraram mais eficientes na manutenção do abatimento inicial (trabalhabilidade).

As incorporações das cinzas pesadas nos concretos exigiam maior quantidade de água para produção de concretos, a fim de atingirem uma mesma trabalhabilidade, porém forneceu um melhor desempenho na resistência a compressão quando comparado ao concreto sem uso das cinzas pesadas (concreto de referência).

Através dos resultados obtidos das curvas de dosagens pode-se observar, nos concretos com incorporação de cinza pesada em relação aos concretos de referência, uma redução significativa no consumo de cimento para a obtenção de concretos com as mesmas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

ABSTRACT

The industrial sector in Brazil is continuously growing every day. This growth leads to an increasing output of sub-products or industrial residues. Consequently the cost of handling or disposing of such material is also growing.

The employment of these industrial residues as construction material has proven to have good perspectives and to be technically and economically viable, as demonstrated by studies and research.

Intending to support the search for new applications for industrial sub-products of charcoal burning several studies have been made. The employment of concrete with different consumption of cement, different quantities in the replacement of natural aggregates by bottom ash, as well as different substitutive quantities of cement by bottom ash, in dosage with different types of Portland cement, shall be demonstrated in the paper.

To present a more trustworthy comparison between different types of concrete, these were mixed for the same slump test (workability). Whenever a slump test decrease was evaluated, concrete masses containing bottom ash demonstrated being more efficient, maintaining the initial slump test (workability).

The incorporation of bottom ash in concrete required more water for the production of concrete, in order to get the same workability, although it demonstrated a better resistance to compression if compared to concrete without the employment of bottom ash (referential concrete).

Observing the results of dosage curves / graphics, concrete containing bottom ash, compared to referential concrete, a considerable economy of cement was obtained in concrete with the same proprieties, in fresh as well as in the hardened state.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema

O aproveitamento das cinzas oriundas da queima do carvão mineral na região Sul brasileira tem demandado cada vez mais a realização de estudos que viabilizem seu emprego em aplicações que permitam a absorção deste material gerado em grande escala.

Apesar da cinza pesada e da cinza leve serem disponíveis em grandes quantidades, vários são os estudos realizados quanto à utilização das cinzas volantes, enquanto que as cinzas pesadas praticamente não foram estudadas e seu aproveitamento é bastante reduzido. O enfoque para as cinzas volantes deve-se às características físicas, a sua forma de estocagem em silos e com o mínimo de beneficiamento o material está pronto para substituição de parte do cimento Portland. Em contrapartida, a cinza pesada para ser utilizada com o mesmo objetivo, deve ser submetida a uma moagem e secagem prévia, encarecendo o produto.

No entanto, alguns pesquisadores como GHAFORI e BUCHOLC (1997) têm encontrado ótimos resultados na utilização da cinza pesada como parte da areia, devido às características físicas mais grosseiras que a cinza volante e semelhante à areia por ela substituída.

Os grandes motivadores para realização deste trabalho foram a produção de concretos mais econômicos e o auxílio na solução de um grande problema ecológico, que é a redução da deposição de resíduo da queima de carvão, principalmente considerando-se que o consumo de carvão para a produção de energia elétrica teve um aumento significativo nesta última crise energética.

A GERASUL (Centrais Geradoras do Sul do Brasil S.A.) sediada em Florianópolis, possui o maior complexo de Usinas Termelétricas no Brasil, localizada em Capivari de Baixo – SC. No Complexo Jorge Lacerda são gerados aproximadamente um milhão de toneladas de cinzas (40% cinza pesada e 60% cinza leve), sendo que são aproveitadas somente 30% desta cinza POZZOBON (1999), demonstrando com isso, um mercado muito grande para a comercialização e que pode ser explorado.

1.2 *Objetivos da Pesquisa*

1.2.1 **Objetivo Geral**

Produzir concretos estruturais com uso das cinzas pesadas, tanto na substituição da areia quanto na substituição do cimento pela cinza pesada de termelétrica de carvão.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

- Estabelecer curvas de dosagens para a produção de concretos com uso das cinzas pesadas;
- Analisar a viabilidade econômica da substituição de parte da areia e do cimento pela cinza pesada na confecção de concretos, através de curvas de dosagem, comparação de consumo de materiais aos concretos convencionais;
- Analisar a viabilidade do emprego da metodologia de dosagem experimental desenvolvido pelo IPT/EPUSP (método dos 4 quadrantes);
- Avaliar a influência da cinza pesada na resistência à compressão nas primeiras idades dos concretos produzidos com cimento Portland ARI;
- Comparar as propriedades das misturas dos concretos com cinza pesada realizados com diferentes tipos de cimento;
- Avaliar a ação pozolânica da cinza pesada em idades avançadas (acima de 28 dias) devido a grande quantidade de partículas menores a 75 μm ;
- Verificar a influência da cinza pesada na demanda d'água do concreto ;
- Verificar a influência da cinza pesada na perda de abatimento;
- Analisar quais são os melhores teores de substituição, da areia e do cimento, para a produção de concretos utilizando cinza pesada, levando em conta o desempenho e os custos de produção;

- Viabilidade do uso da cinza pesada em concretos com fins ecológicos – ecoeficiência.

1.3 Hipóteses

1.3.1 Hipótese geral

A utilização de cinza pesada na confecção de concretos, desde que devidamente proporcionados, possibilita uma redução de custos do concreto, sem prejudicar seu desempenho.

1.3.2 Hipóteses específicas

- A incorporação da cinza pesada no concreto melhora o seu comportamento no estado fresco;
- A cinza pesada influencia na demanda d'água do concreto;
- A substituição da areia pela cinza pesada, racionalmente utilizada, não compromete a resistência à compressão do concreto;
- A substituição do cimento pela cinza pesada oferece uma redução do custo de produção do concreto, quando comparados concretos com as mesmas propriedades;
- O uso da cinza pesada produz concretos mais resistentes aos ataques de agentes externos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1.1 Tipos de Resíduos Provenientes da Queima do Carvão em Termelétricas

MALHOTRA e MEHTA (1996), afirmam que o combustível constituinte do carvão é composto principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio, com elementos em menor quantidade como nitrogênio e sulfatos. A qualidade do carvão depende da quantidade de cinza como impureza não combustível, de 10% a 40%, presente na forma de argila, xisto, quartzo, feldspato, e calcário.

Da queima do carvão em termelétricas, são gerados três principais resíduos, que são:

- **cinza leve** (cinza volante ou cinza seca) – constituída por partículas extremamente finas (100% com dimensão inferior a 0,15mm), transportada pelo fluxo dos gases da combustão, coletada nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos, ou ainda lançada na atmosfera;
- **cinza pesada** (cinza úmida) – é mais pesada e de granulometria mais grossa que a cinza leve, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo freqüentemente retirada por um fluxo de água e;
- **escória** (cinza grossa) – é a cinza originada na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas móveis. Retirada pelo fundo da fornalha após ser resfriada com água. Freqüentemente apresenta granulometria grosseira e blocos sinterizados, tendo teores de carbono não queimado entre 10 e 20%.

POZZOBON (1999) afirma que dentre os resíduos industriais originados, a cinza do carvão mineral ocupa lugar de destaque, por estar presente na maioria dos processos de geração de energia. As cinzas são formadas a partir de componentes não combustíveis de carvão e, também, de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na câmara de combustão, em temperatura variável entre 1200 e 1600°C. O carvão mineral produzido e utilizado no Brasil como combustível, em complexos energéticos e industriais, contém altos teores de matéria mineral (até 60%) responsável pela geração dos resíduos (SILVA et al (1997)).

Segundo GOTHE (1990), o potencial poluidor das cinzas depende, das concentrações dos elementos tóxicos e do grau de solubilização destes elementos no ambiente natural.

CHERIAF et al (1999) mencionam que dois tipos de cinzas são produzidos no Complexo Jorge Lacerda: cinza leve e pesada, devido à queima do carvão pulverizado. As cinzas pesadas são desagregadas previamente e transportadas até as lagoas de decantação através do bombeamento hidráulico.

2.2 Breve Histórico da Produção de Cinzas

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), a produção mundial estimada de cinza volante só no ano de 1993, foi de 450 milhões de toneladas, sendo que a proporção típica da produção de cinza volante : cinza pesada é de 70:30.

Segundo dados do Energy Information Administration – EIA (2001) no ano de 1998 cerca de 32% da energia produzida nos Estados Unidos foi originária da queima do carvão. Esta porcentagem significa o consumo de 910,9 milhões de toneladas de carvão só naquele ano.

SILVA et al (1997) relatam que a demanda mundial de carvão até o ano de 2020 é crescente, sendo que nos próximos anos provavelmente duplicará. Ele aponta como razões deste crescimento à abundância e facilidade de extração do carvão, bem como, o domínio da tecnologia da queima do carvão e a falta de outras fontes de energia que possam substituir a gerada pelo carvão, em economia. Por esse crescimento no consumo do carvão para geração de energia, também haverá um crescimento na produção de cinzas.

No Brasil a tendência é crescente no consumo de carvão para a produção de energia elétrica, devido a atual crise energética. Nesse momento buscam-se alternativas para suprir as deficiências energéticas a qualquer custo. Um outro fator que estimula ainda mais a busca deste tipo de energia está na constância no fornecimento da mesma, já que não depende das condições climáticas, como é o caso das hidroelétricas, que segundo relatório da ELETROBRÁS (1997) são responsáveis por 96,6 % da energia consumida no Brasil.

2.3 *Propriedades das Cinzas de Termelétricas*

POZZOBON (1999), afirma que de um modo geral, nas análises realizadas com a cinza produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, os resultados de lixiviação, segundo a NBR 10.005, não ultrapassaram os limites de material perigoso prescritos, classificando como resíduo não perigoso. O teste de solubilização, segundo a NBR 10.006, indicou alguns parâmetros acima dos padrões de potabilidade da água, enquadrando esta cinza na classe dos resíduos **não inertes**, classificação da maior parte das cinzas de carvão mineral.

A cinza pesada usada nos estudos de TESSARI e CONSOLI (1998) não ultrapassou nenhum dos limites estabelecidos para a classificação de material inerte, através dos ensaios de solubilização e lixiviação. SANCHÉZ *et al* (1998) realizaram análises detalhadas das várias cinzas pesadas das termelétricas brasileiras, e concluíram que somente uma das cinco amostras classifica-se como resíduo de classe II (material não inerte). O restante pode ser classificado como material de classe III (resíduo inerte). Já ROHDE (1998) cita que a maioria das cinzas brasileiras é classificada como classe II.

Segundo SILVA *et al* (1997) 30% dos resíduos da combustão do carvão consumidos no mundo são aplicados em produtos de concreto e fabricação de cimento.

2.3.1 Análise Química e Classificação das Cinzas de Carvão

Na Tabela 2.1, são mostrados os resultados da análise química que geralmente as cinzas volantes e pesadas originárias do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda apresentam.

Tabela 2.1 - Constituintes de amostras de cinzas de termelétricas

CONSTITUINTES	CINZA PESADA (%)	CINZA LEVE (%)
SiO ₂	55,98	58,00
Al ₂ O ₃	26,73	27,48
Fe ₂ O ₃	5,80	5,66
MnO	0,02	0,03
MgO	0,59	0,88
CaO	0,84	1,68
Na ₂ O	0,25	0,30
K ₂ O	2,59	2,74
TiO ₂	1,33	1,41
P ₂ O ₅	0,24	0,28
Perda ao fogo (P. F.)	4,61	1,15
CO ₂ total	13,99	2,30
C orgânico	3,79	0,63
S total	0,08	0,10
Cl	0,02	0,00

Fonte: ROCHA *et al* (1999)

CHERIAF *et al.* (1999) concluíram que a cinza pesada proveniente do complexo Termelétrico Jorge Lacerda é muito pobre em CaO (0,8%), apresentando certa similaridade com a cinza tipo F (conforme classificação da ASTM).

2.3.2 Atividade Pozolânica

Segundo a NBR 12653 (1994), materiais pozolânicos são “*materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes*”.

CHERIAF *et al* (1999) submeteram uma amostra de cinza pesada, oriunda da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, ao ensaio de reatividade pozolânica com cal. Os índices de atividade foram maiores que os prescritos pela norma, chegando a conclusão que a cinza pesada é apropriada para ser usada em concreto.

CHERIAF *et al* (1999) estudaram as diferenças das atividades pozolânicas de uma amostra de cinza pesada quando submetida à moagem por um período de até 6 horas. Eles concluíram que a moagem da cinza pesada melhora a sua reação pozolânica, já que

a índice de atividade pozolânica aumentou 27% quando a cinza pesada foi moída por 6h, além do que a relação água/cimento reduziu de 0,62 para 0,57.

RANGANATH et al (1998) examinaram a reação com cal de diferentes cinzas oriundas de lagoas de decantação (compostas por cinza pesada e cinza volante), separadas em tamanhos de partículas por 3 frações: fração F (com tamanhos $<20 \mu\text{m}$); fração M (tamanhos entre $20\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m}$) e fração C (tamanhos entre $75\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$). Os autores avaliaram as características físicas, químicas e mineralógicas das partículas, bem como a reatividade com cal das diferentes frações. Para a fração F ($<20 \mu\text{m}$) foram conferidas maiores massa específica, finura e reatividade com cal em relação às outras frações, enquanto que as frações ($75\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$) obtiveram baixos resultados. Através disso os autores concluíram que a presença de partículas maior de $75\mu\text{m}$ nas bacias afeta negativamente as características físicas das cinzas para o presente uso.

Foi observada perda de massa ao fogo em torno de 50% superior na fração C em relação à fração F. Na fração F observou-se maior quantidade de sílica solúvel, sugerindo, segundo os autores, partículas mais reativas. Pela difração de raios-X (DRX) feitas nas frações F e M, indicou a presença de fase vítrea maior na fração F em comparação com a fração M. Pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram observados diferenças de partículas para as diferentes frações, para a fração F, observou-se partículas bastante esféricas e até a presença de partículas de $1\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$; para a fração M, as partículas são pouco esféricas; já para as frações C, mostraram-se partículas largas, sinterizadas e de superfície irregular.

RANGANATH et al (1998) através da análise das micrografias das argamassas rompidas aos 7 dias, constataram que na fração F houve o começo da reação pozolânica evidenciada pela desintegração de algumas partículas, enquanto que para a fração C foi observado somente algum traço. Através da análise da porosidade por Intrusão de Mercúrio nas diferentes argamassas aos 7 e 28 dias, concluíram que devido à mesma quantidade de poros a cerca de 500 \AA nas duas idades para a fração C, a sua baixa pozolanicidade, já que para as outras frações a quantidade de poros de grandes dimensões são menores.

RANGANATH et al (1998), analisaram as argamassas quanto à resistência à compressão aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Foi observada que para todas as idades a fração C

apresentou menor resistência comparada às outras duas frações. Os autores atribuem a reduzida reação pozolânica desse material à presença reduzida de partículas menores de $45\mu\text{m}$, que segundo eles, são responsáveis pela produção de pontos de nucleação para a reação pozolânica. Para a idade de até 14 dias, a resistência à compressão são similares. A partir dessa idade, há um melhor aumento de resistência na fração F aos 28 e 90 dias comparado à fração M. Para a argamassa confeccionada com a fração C, houve uma tendência de crescimento similar as outras frações até os 28 dias, a partir daí houve menores aumentos de resistência até a idade observada de 90 dias.

TAYLOR E KRUGER (1997) confeccionaram concretos de referência e concretos com diversas frações de cinza volante na proporção de 60:40 (cimento:cinza leve), objetivando determinar o efeito do uso de cinza leve com diferentes tamanhos de partículas no material cimentante. Foram usados 3 tamanhos de peneira para separar a cinza pesada, abertura de malha de $20\mu\text{m}$, $45\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m}$, sendo que as peneiras foram usadas separadamente, a fim de peneirar as partículas em tamanhos maiores e menores de: $20\mu\text{m}$; $45\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m}$. Utilizaram-se 2 tipos de cimento. Segundo uma análise química realizada com todas as cinzas, elas diferenciam-se muito pouco, sendo a maior diferença observada para alguns compostos como (SO_3 , Fe_2O , P_2O_5 , CaO e Na_2O), onde as partículas de menor diâmetro tiveram maiores porcentagens destes compostos que os de maiores diâmetros.

Os concretos que TAYLOR E KRUGER (1997) confeccionaram para o ensaio de resistência à compressão, foram em cubos de 100mm de aresta e curados em água na temperatura de 22°C até testá-los aos 1, 3, 7, 28 e 56 dias. Os melhores resultados para esse ensaio foram para os concretos contendo cinza volante com maior finura, sendo que as partículas de grande tamanho não contribuíram significativamente para o processo de hidratação. Segundo os autores, *“a falta de pequenas partículas nas cinzas volantes, classificadas como de grande tamanho, pode resultar em baixo empacotamento aumentando as distâncias entre as partículas de cimento e cinza volante. Algumas dessas partículas, no entanto participam da reação pozolânica, apesar de ser lentamente”*. Para os ensaios de permeabilidade ao ar e absorção de água, os autores observaram que esses índices foram maiores para os concretos contendo cinzas leves com maiores diâmetros, que aqueles contendo os menores, sendo que para os concretos de referência os índices ficaram no patamar intermediário.

RANGANATH et al (1998), concluíram que as partículas de cinza menores que 75 μm podem ser consideradas como reativas e pozolânicas. Já as cinzas no estado em que se encontram nas bacias, com a mistura de vários tamanhos de grãos, perdem bastante em capacidade de ganho de resistência à compressão, devido à presença de partículas grandes, sinterizadas e incombustas. Os autores aconselham fazer uma retirada das partículas não reativas e de grande tamanho utilizadas na produção de cimentos, como também não misturar cinzas volantes coletadas nos precipitadores eletrostático e as pesadas quando se pretende usá-las como pozolana.

MALHOTRA e MEHTA (1996) classificam a cinza pesada como uma adição mineral ao concreto, de fraca ação pozolânica.

Segundo GAVA (1999), diante da grande disponibilidade de materiais pozolânicos, aliada às novas exigências de materiais de construção que atenda o quádruplo enfoque, iniciado pela letra E, apontados por MEHTA e MONTEIRO (1994): “Engenharia, Economia, Energia, Ecologia, o aumento na incorporação de subprodutos industriais que apresentem características pozolânicas torna-se de fundamental importância. Assim, há a necessidade de desenvolvimento de normalizações menos prescritivas e principalmente de metodologias de ensaios que avaliem o real desempenho das pozolanas quando adicionadas a concretos e argamassas”.

2.3.3 Densidade das Cinzas

MEHTA e MONTEIRO (1994) mostram através de evidência microscópica, que a maior parte das partículas na cinza volante ocorre como esferas sólidas de vidro, mas às vezes pode estar presente um pequeno número de esferas ocas, chamadas cenosferas (completamente vazias) e plerosferas (preenchidas com muitas esferas pequenas).

CHERIAF et al (1999) identificaram a presença de partículas ocas (cenosferas e plerosferas) na cinza pesada que estudaram, atribuindo a essa morfologia a baixa massa específica encontrada. Os autores mostraram, através de micrografias, que na cinza pesada, há a presença tanto de partículas esféricas como de partículas totalmente irregulares.

KOLAY e SINGH (2001) estudaram cenosferas oriundas de lagoas de decantação de uma termelétrica indiana movida a carvão, quanto as suas características físicas,

químicas, mineralógicas e térmicas. Foram coletadas as cinzas que ficavam flutuando nas bacias de decantação. Elas possuíam tamanhos entre 30 μ m a 55 μ m, massa específica de 0,78g/cm³, e área específica de 45,7m²/kg, valores estes, muito menores que os referentes à cinza coletada nos precipitadores eletrostáticos, que segundo os autores são devidos à perfeita esfericidade e uniformidade do material.

KOLAY e SINGH (2001) afirmam que as cenosferas são esferas ocas, leves e inertes constituindo principalmente de sílica e alumina, preenchidas com ar ou gases aprisionados (geralmente com bolha de CO₂ e N₂) vindo do derretimento de material de resíduo inorgânico do carvão. A quantidade de cenosferas presentes na cinza depende da porcentagem de carbono e ferro no carvão. Segundo a análise química a perda de massa ao fogo foi de 4,2% e a porcentagem de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O foram de 53,53%, 30,01% e 7,53%, respectivamente. Através da análise termogravimétrica (ATG) os autores observaram a 300°C e perda de massa maior de 90%, atribuindo ao fato da expulsão do ar ou gás aprisionado nas cenosferas. Já pela análise térmica diferencial (ATD) observaram um pequeno pico endotérmico aos 330°C, sendo atribuído a expulsão da água dissolvida no material vítreo das amostras.

2.4 Uso das Cinzas de Carvão como Matéria-prima

2.4.1 Histórico

A primeira utilização da cinza leve de carvão mineral, como agente cimentante no concreto, data de 1936, sendo usado em alguns quilômetros de parede de retenção ao redor do lago de Michigan nos Estados Unidos SILVA & CERATTI (1980). No Brasil, o emprego sistemático de cinza volante como pozolana iniciou na década de sessenta, com a construção das estruturas de concreto do aproveitamento hidrelétrico de Jupia ABREU (1993).

MANZ (1997) afirma que o maior uso de cinza de carvão é em concreto. O autor fez levantamentos periódicos desde 1977 sobre produção e utilização das cinzas de carvão e ele avalia como crescente o uso das cinzas de carvão em concretos.

Muitos trabalhos já foram feitos a cerca da utilização da cinza volante oriunda de termelétrica, por apresentar comprovada propriedade pozolânica. Mas poucos trabalhos são referenciados quanto à utilização da cinza pesada. Segundo o estudo realizado por

POZZOBON (1999), o comércio de cinza volante perderá espaço para a cinza pesada somente quando a primeira estiver em falta ou for totalmente utilizada.

O apelo do uso de cinza substituindo parte do clínquer, na produção do cimento composto, é um modo seguro e barato da destinação final das cinzas, contribuindo para a conservação da energia usada na fabricação de cimento, e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração agride o meio ambiente.

De acordo com ISAIA (1996), como grande parte das cinzas produzidas possui atividade pozolânica, isto é, origem silicosa e mineralogicamente amorfa e, ainda, reatividade com a cal, a indústria da construção civil é a mais indicada para consumi-la, em produtos derivados do cimento Portland.

2.4.2 Propriedades de Concretos com Cinza

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) os propósitos da dosagem dos concretos está em obter um desempenho que atenda a certos requisitos previamente estabelecidos, sendo os mais importantes a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido. Outra propriedade importante é a durabilidade, geralmente ligada à resistência. Por fim, objetiva-se obter uma mistura de concreto que satisfaça os requisitos de desempenho ao mínimo custo possível.

GHAFOORI e BUCHOLC (1996, 1997) realizaram um grande estudo com o uso de cinza pesada (da combustão de carvão) como substituição em volume de 50% e 100% do agregado fino na produção de concreto, usando 2 tipos de cimento (Tipo I e Tipo V segundo classificação da ASTM C 150) e em 4 diferentes quantidades de cimento: 297, 356, 416, e 475 kg/m³. Os autores pesquisaram as propriedades físicas e químicas dos constituintes. Para os concretos confeccionados com o cimento Tipo I, foram analisadas as características dos concretos no estado fresco como trabalhabilidade, estabilidade, tempo de pega, retração plástica, porcentagem de ar incorporado, massa específica; no estado endurecido estudaram a resistência à compressão, rigidez, retração por secagem, inchamento, abrasão e resistência ao gelo/degelo. Para os ensaios com o concreto confeccionados com o cimento Tipo V, foram feitos testes de durabilidade em idades tardias como ataque de sulfato e permeabilidade a cloretos.

Segundo os autores, a cinza pesada usada no estudo é bem graduada seguindo a ASTM C 618, sendo que o módulo de finura deste material foi igual a areia fina da qual ela substituiu. A densidade relativa foi de 2,66 e 2,47 para a areia e cinza pesada respectivamente. Pela análise através da Microscopia Eletrônica, a cinza pesada revelou-se com superfície irregular, angulosa, com poros e textura rugosa, que segundo o autor influenciou no aumento da demanda d'água das misturas com seu emprego, para alcançar a trabalhabilidade necessária para igualar aos concretos de referência. A perda média de massa ao fogo ficou em 1,13%.

Para os pesquisadores manterem o abatimento de 10 ± 6 mm nos concretos, foi necessário o aumento da demanda de água nos concretos com substituição da areia pela cinza pesada. Para melhores comparações, foi moldada uma série especial com 50% de substituição da areia pela cinza pesada e com a adição de aditivo redutor d'água, para manter a relação água/cimento próxima a do concreto de referência.

Quanto ao estudo do concreto no estado fresco, os autores observaram um aumento na exsudação da água em torno de 90% para o concreto com cinza pesada sem aditivo em relação ao concreto de referência. Já com a presença de aditivo, a exsudação foi reduzida para valores similares aos do concreto de referência. As porcentagens de ar incorporado para todas as misturas foram similares e variando linearmente de 1,5% a 1,9% para os concretos de referência e de 1,4% a 1,8% para os concretos contendo cinza pesada, sendo que o uso de redutor de água não influenciou nesta propriedade. Para o início e fim de pega não foram notadas grandes diferenças entre os concretos de referência e os concretos com cinza pesada; sendo que houve um aumento de 6,3% e 9,4% no início e final de pega nos concreto com incorporação de cinza pesada sem uso de aditivo. Os pesquisadores concluíram que o uso de cinza pesada reduz a retração plástica em aproximadamente 35% em relação ao concreto de referência. Os ensaios de densidade dos concretos há um dia, mostraram que devido a menor massa específica e um maior consumo de água por parte dos concretos com 100% de cinza pesada a areia fina, a densidade das amostras destes concretos foram 3,3% menores aos concretos de referência, já para os concretos com 50% de substituição, os resultados foram semelhantes aos concretos com densidade normal.

Para as características de resistência à compressão, GHAFOORI e BUCHOLC (1996) e (1997), obtiveram nas idades de 3 e 7 dias 30% e 25% a mais na resistência à

compressão dos concretos com areia em relação ao de substituição com cinza pesada, utilizando a mesma quantidade de cimento por metro cúbico. No entanto em idades maiores as resistências à compressão das misturas com cinza pesada se aproximam bastante ao concreto de referência, ficando em torno de 7% a menos aos 180 dias. Quando usado aditivo redutor d'água, a resistência à compressão aos 180 dias ficou acima dos concretos de referência 9,5%, 14,5%, 23,6% e 35% com dosagens de 297, 356, 416, e 475 kg/m³ respectivamente.

Os autores ensaiaram os concretos quanto à resistência por compressão diametral, sendo que os resultados foram bastante próximos para todos os concretos, com exceção para aqueles onde foi usado o aditivo redutor de água, onde demonstrou um aumento entre 12% e 17% na resistência à tração até os 180 dias. O ensaio de resistência à flexão foi realizado até a idade de 90 dias, e esse ensaio demonstrou que não houve redução dessa resistência no concreto com cinza pesada em relação ao de referência, mas quando utilizado o redutor d'água, a resistência à tensão de flexão foi superior ao de referência.

Em concretos com consumo de 356 e 475kg/m³ de cimento, GHAFUORI e BUCHOLC (1996) e (1997) realizaram ensaios a inchamento e a retração por secagem até a idade de 370 dias. Observaram que as leituras se estabilizaram entre as idades de 150 e 200 dias. O inchamento teve valores médios de 200% a mais para concreto com cinza pesada em relação ao concreto de referência, mesmo para os concretos onde foram usados aditivos redutores de água. Já na retração por secagem notou-se, mesmo com um aumento na relação água/cimento, que os concretos com cinza pesada tiveram retrações menores que os de referência, sendo que os autores não conseguiram explicar a sua causa.

Os pesquisadores notaram similares inchamentos dos concretos quando submetidos ao ataque de sulfato. Com relação à resistência a abrasão, o concreto com substituição total da areia pela cinza pesada obteve em torno de 40% a mais de profundidade de abrasão do que o de referência, enquanto que a combinação 50% areia fina e 50% cinza pesada, teve de 8,3% a 16,8% a menos de profundidade de abrasão em relação ao de referência. Os autores concluem através desse estudo que a cinza pesada pode ser usada como agregado fino na produção de concreto de alta resistência com grande eficiência.

RAVINA (1997), estudou concretos com substituição entre 100kg e 200 kg da areia fina por cinza volante, em volume. Os concretos de referência e com substituição da areia pela cinza volante apresentavam consumo de cimento Portland comum de 270 kg/m^3 , foram também confeccionados concretos sem adição de cinza volante com consumo de 310 e 235 kg/m^3 de cimento. O autor testou as propriedades dos concretos frescos como trabalhabilidade, quantidade de água requerida, exsudação e tempo de pega, nas temperaturas de 21°C e 32°C , com e sem uso de aditivos químicos (plastificante e superplastificante). Já em (1998) o mesmo autor, dando continuidade a pesquisa estudou os mesmos tipos de concretos quanto às propriedades do estado endurecido como: resistência à compressão nas idades de 1, 7, 28, 90 e 180 dias; módulo de deformação aos 8 ou 9 meses; retração por secagem aos 14, 21, 28, 56 e 180 dias, tendo como referência zero aos 7 dias, onde os corpos de prova foram tirados da água; e determinação da profundidade de penetração da água sobre pressão na idade de 90 dias.

A cinza volante usada por RAVINA (1997) e (1998), apresentava as seguintes características: finura (resíduo em $45 \mu\text{m}$) de 17%; massa específica de $2,21\text{g/cm}^3$; perda de massa ao fogo 5,96%; atividade pozzolânica (de acordo com a ASTM C 311) aos 28 dias de 73%. Enquanto que a areia fina natural possuía módulo de finura de 1,12 e massa específica de $2,630\text{g/cm}^3$.

RAVINA (1997) manteve constante a trabalhabilidade, com o abatimento do tronco de cone em $125 \pm 12\text{mm}$, ajustando para isso a quantidade de água, que variou muito pouco entre os diferentes concretos (referência e com adição de cinza volante), mas sem a adição de plastificantes. Para os concretos de referência e para os concretos entre 100 e 150 kg de substituição, a quantidade de água requerida foi praticamente igual, enquanto que para as substituições de 175 e 200 kg da areia fina pela cinza volante, houve um acréscimo na demanda d'água entre 8% e 15%. Com a substituição da areia fina pela cinza volante, houve o aumento da pasta nas misturas. Segundo o autor, esse feito aumenta significativamente a coesão, a compactação e a bombeabilidade do concreto.

Quanto à exsudação, RAVINA (1997) mostrou que os concretos de referência e os concretos com substituição de areia pela cinza volante, apresentam praticamente os mesmos resultados.

Para medir o tempo de pega, RAVINA (1997) utilizou para o ensaio, os procedimentos adotados pela ASTM Standard Method C 403, onde definiu como início e fim de pega, o tempo decorrido desde o contato da água com o cimento até a resistência a penetração de 3,5MPa e 27,6MPa respectivamente. Fazendo-se uma comparação, observou-se que para o concreto com 125 kg de substituição, o início e final de pega foram de 45 e 65 minutos a mais do que o concreto de referência. Quando foram usados aditivos, os concretos com cinza volante ainda apresentaram um retardo no tempo de pega em relação aos de referência, porém as diferenças foram menores.

RAVINA (1998), ao analisar o concreto no estado endurecido, identificou um efeito benéfico das cinzas nas suas propriedades. Nas idades de 1 e 7 dias as resistências à compressão foram praticamente as mesmas, enquanto que nas idades de 28, 90 e 180 dias, os resultados com os concretos utilizando cinza volante foram significativamente superiores aos de referência (por exemplo: de 40MPa para 53 MPa entre os concretos de referência para os de substituição). Ele concluiu que o efeito da cinza volante na resistência à compressão pode ser devido a diferentes mecanismos. Nas primeiras idades, a maior contribuição para a resistência à compressão vem do efeito filler. Sendo que o filler é um material finamente dividido que exerce duas funções: uma de empacotamento e outra reação físico-química, que seria a 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. O autor concluiu que nas idades acima de 28 dias, o efeito no aumento da resistência à compressão é devido à reação pozolânica, já que os concretos com o uso da cinza volante tiveram aumento da resistência à compressão maior que o de referência, quando esses concretos passaram das idades de 28 aos 90 dias.

RAVINA (1998) observou para o módulo de deformação, um aumento de 8 a 17 % para o concreto com cinza leve em relação ao de referência. As retrações por secagem, observadas nos concretos com cinza volante, foram semelhantes e até menores que as de referência. Também foi observada que a maioria das misturas com cinza leve tiveram menores penetrações de água sob pressão.

DHIR et al (2000) estudaram a influência da armazenagem de dois lotes de cinza volante de termelétrica a óleo, substituindo a areia pela cinza leve armazenada 1 mês e 12 meses, bem como a cinza volante recém produzida. Esse estudo realizou-se devido à

molhagem da cinza leve excedente para o armazenamento, com isso não sendo possível o uso como cimentante, mas usado como agregado fino segundo a BS 3896. Os ensaios realizados nos concretos foram trabalhabilidade, coesão, exsudação, acabamento e resistência à compressão nas substituições de 5% e 15% em massa da areia pela cinza volante.

Segundo o estudo de DHIR et al (2000), o acondicionamento da cinza leve com 10% de umidade a uma temperatura de 20° durante 12 meses é prejudicial à qualidade da cinza leve, sendo que o armazenamento por 12 meses aumenta em torno de 100% o material retido na peneira de 45 µm devido à aglomeração das partículas, com isso refletiu na natureza química e física das partículas. Destaca-se que as cinzas tinham perda de massa ao fogo de 6%, teor de SiO₂=50%, CaO=2,9, Fe₂O₃=7,5. O material retido na peneira de 45µm foi 7,3% e 21,5% para as amostras 1 e 2 respectivamente.

Os concretos foram confeccionados com 350 kg/m³ de cimento Portland e relação água cimento de 0,53. Para o concreto de referência e com cinza leve seca (sem armazenagem) o slump slump foi de 75 mm. À medida que foram substituídos por cinza leve armazenada, o slump test diminuía. No entanto quando ensaiados a coesão, pelos resultados dos ensaios, não houve nenhuma diferença entre os diferentes concretos.

DHIR et al (2000) avaliaram a resistência à compressão aos 28 e 90 dias, sendo que houve maior aumento de resistência tanto maior o teor de substituição da areia pela cinza leve, independente do tipo de cinza leve empregada. Concretos com a cinza leve seca apresentaram pouca melhora nos resultados quanto à resistência à compressão, em relação aquelas armazenadas durante 1 mês, mas significativamente maiores do que as cinzas volantes armazenadas por um período de 12 meses. No entanto todas as substituições da areia pela cinza leve foram benéficas, dando destaque às cinzas leves mais finas que proporcionaram em todos os casos, maiores resistências à compressão.

DHIR et al (2000) mediram a quantidade de hidróxido de cálcio presente nas misturas até 28 dias. Pelos resultados demonstrados, houve um consumo do hidróxido de cálcio a partir dos 7 dias para os concretos com cinza leve, sendo mais destacado o consumo para as misturas com cinza leve seca, pois para as cinzas com grande tempo de estocarem, o autor obteve indicativos de redução no potencial pozolânico.

De um modo geral, as incorporações de cinzas ao concreto podem ser úteis na melhoria de algumas propriedades, como: aumento da trabalhabilidade, redução do calor de hidratação, redução do consumo do cimento, redução da permeabilidade e aumento da durabilidade.

MALHOTRA e MEHTA (1996), citam que as adições minerais, de uma maneira geral, influenciam nas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido. Eles afirmam que a composição química não exerce tanta influência quanto o tamanho, forma e textura das partículas das adições minerais.

2.4.3 Propriedades dos Concretos no Estado Fresco

2.4.3.1 *Trabalhabilidade*

NEVILLE (1997) define como um concreto trabalhável, aquele que pode ser adensado com facilidade. Infelizmente não existe um ensaio aceitável que determine diretamente a trabalhabilidade conforme esta definição. O ensaio usado universalmente, que mede a consistência (aproxima bastante da trabalhabilidade) é denominado ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test), sendo muito útil para detecção de variações da uniformidade de uma mistura.

A trabalhabilidade depende de diversos fatores relativos aos materiais, como: a forma e textura das partículas dos agregados, relação água/cimento e consumo de água.

Segundo NEVILLE (1997), a perda de abatimento (trabalhabilidade) dos concretos pode ser definida como perda de fluidez do concreto fresco com o passar do tempo. Segundo o autor, a diminuição do abatimento é um fenômeno normal em todos os concretos porque resulta do enrijecimento gradual, tanto por perda de parte da água da mistura provocada por perdas na evaporação e remoção pelas reações iniciais de hidratação.

BAZUCO (1999), confeccionou concretos utilizando agregados graúdos reciclados, os quais apresentaram alto teor de absorção. O autor concluiu que incorporando os agregados secos ao concreto, a perda de abatimento foi 20% maior em relação ao concreto de referência. Devido a cinza pesada ser um material altamente absorvente e em menor escala ter um aspecto semelhante aos agregados reciclados, no presente

estudo decidiu-se pela utilização das cinzas no estado úmido, a fim de diminuir a perda de abatimento.

2.4.3.2 Exsudação

NEVILLE (1997) define exsudação como uma forma de segregação em que parte da água da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém aplicado. A tendência de exsudação depende das propriedades do cimento. Diminui-se a exsudação quando se aumenta a finura do cimento e quando há maiores teores de álcalis ou quando se adiciona cloreto de cálcio. O autor ainda esclarece que a presença de partículas muito finas de agregado, preferencialmente menores que 150 μm , também reduzem a exsudação.

GHAFOORI e BUCHOLC (1996, 1997), estudaram a substituição em massa de 50% e 100% do agregado pela cinza pesada, observaram um aumento linear da exsudação da água dos concretos com cinza pesada, comparado ao concreto de referência. Os autores atribuem a maior porcentagem de água exsudada ao aumento da demanda d'água da mistura para atingir a mesma trabalhabilidade, pois quando usando relações água/cimento similares (devido à incorporação de um aditivo redutor d'água), os valores de exsudação aproximaram-se muito entre o concreto com cinza pesada e o de referência. Eles atribuem o aumento do teor de água nos concretos à superfície porosa e formas angulares das partículas de cinza pesada.

2.4.4 Efeitos da Absorção dos Agregados no Concreto

Não se pode deixar de associar a cinza pesada aos agregados leves, já que os dois possuem algumas características semelhantes como menor massa específica e maior absorção de água que os agregados ditos normais.

Segundo NEVILLE (1997), devido a maior absorção de água pelos agregados leves, em relação aos agregados “normais”, o estabelecimento da relação a/c não é simples, já que esta relação não pode ser estabelecida baseada simplesmente na água total, pois segundo o autor, a água absorvida não tem influência na formação de poros capilares, os quais têm efeito na resistência. O autor continua, afirmando que esta absorção pelos agregados leves, pode ajudar na disponibilidade de água para a hidratação quando a

umidade dos poros da pasta de cimento endurecida já foi consumida. Denomina-se esta situação de “cura úmida interna”.

2.4.5 Grau de Hidratação do Cimento e Ganho de Resistência dos Concretos com Cinza no Estado Endurecido

Segundo LÉA (1970) o ganho de resistência de um cimento desde a pega, é devido a sua hidratação. Assim sendo, algumas relações entre o grau de hidratação e a resistência podem ser esperadas. No entanto, o grau que os diferentes componentes no cimento contribuem para a resistência, não é o mesmo, embora alguns dos componentes, tais como: aluminato tricálcico (C_3A), ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) e silicato tricálcico (C_3S) hidratam rapidamente, sendo que o último é responsável pela maior parte da evolução de resistência. O silicato dicálcico (C_2S) hidrata vagarosamente, mas progressivamente, também contribuindo para o ganho de resistência. A exata relação entre o grau de hidratação e a resistência, no entanto não pode ser antecipada.

NEVILLE (1997) afirma que vários são os modos pelos quais pode-se avaliar a evolução da hidratação do Cimento Portland. Para o estudo das primeiras reações podem ser usadas técnicas termogravimétricas e difração por raios-X de pastas frescas em processo de hidratação.

CHERIAF *et al* (1999), estudaram a utilização da técnica de Análise Térmica Diferencial para medir o consumo de hidróxido de cálcio. Utilizando argamassa de cal com cinza pesada, e ensaiando nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias, demonstraram correlações significativas, quando comparado à resistência à compressão com o consumo de hidróxido de cálcio. Os pesquisadores observaram que até os 14 dias a atividade pozolânica com cal é baixa. Mas que esta atividade pozolânica começa aos 28 dias e que o consumo de hidróxido de cálcio é bastante significativo aos 90 dias, a última idade que eles pesquisaram.

HANEHARA *et al* (2001) investigaram vários teores de substituição do cimento pela cinza volante. Eles concluíram que são vários os fatores que afetam na reação pozolânica da cinza volante até os 180 dias, sendo que o aumento da temperatura e/ou o aumento da relação água/cimento também aumentam esta reação. Receia-se que pode ocorrer a própria neutralização da pasta endurecida com a substituição com mais de 60% de substituição do cimento pela cinza leve. Pelos resultados da reação pozolânica,

a máxima substituição do cimento pela cinza volante, que ele recomenda a ser feito em um concreto, é de aproximadamente 40%.

Em um estudo preliminar DEMIRBAS et al (1995), estudaram 11 tipos diferentes de cinzas pesadas de carvão de várias partes da Turquia como mistura mineral em concreto. As cinzas pesadas foram classificadas segundo o teor de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$) presente em duas classes, como Classe A e Classe B para mais de 50% e mais de 70% de óxidos presentes respectivamente. Foram confeccionados concretos de referência e concretos com substituição de 25% do cimento pelos 11 tipos de cinza estudados (4 da Classe A e 7 da Classe B) com consumo de 300kg/m^3 de material cimentante. Na análise de resistência à compressão aos 28 dias, os concretos com cinza da Classe A tiveram um aumento de resistência entre 5,9% e 24,3% acima do concreto de referência, enquanto que para os concretos com a cinza da Classe B houve uma redução entre 4,4% e 16,4% ao concreto referencial.

DEMIRBAS e ASLAN (1999), estudaram as propriedades físicas e químicas obtidas pelas cinzas volantes, cinzas pesadas, misturas de cimento+cinzas, e seu efeito nas propriedades mecânicas de concreto. Nos concretos utilizando as cinzas de carvão a substituição do cimento foi na proporção de 25%. Quando 25% do cimento foi substituído pela cinza pesada, Classe A, a resistência à compressão aos 28 dias aumentou em 18,9% comparado com o concreto de referência. Quando a substituição foi pela cinza da Classe B, houve um decréscimo na resistência à compressão de 3,5% comparada ao concreto de referência. Pelos resultados obtidos e comparados às normas daquele país, as cinzas volantes e cinzas pesadas que eles estudaram podem ser usados como material cimentante.

2.4.6 Durabilidade

Em relação à durabilidade NEVILLE (1997) relata que a deterioração do concreto, às vezes, não deve ser atribuída a um fator em particular, mas a qualidade de um concreto em sentido mais amplo, com especial referência a permeabilidade. Com exceção da deterioração mecânica, todas as influências desfavoráveis decorrem do transporte de fluidos através do concreto. Então a durabilidade do concreto depende muito da facilidade com a qual os fluídos, tanto líquidos como gases, podem ingressar no

concreto e se deslocar no seu interior. Esta característica o autor classifica como permeabilidade do concreto.

NEVILLE (1997) explica que, a rigor, permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido através de um meio poroso. No entanto, no concreto o deslocamento se dá, além do escoamento, por difusão e adsorção. Não obstante usa-se, e será usado, o termo permeabilidade para o movimento global dos fluidos através do concreto. O autor relata ainda que em muitos ensaios de permeabilidade, as medidas são feitas através da absorção do concreto mediante pressão na água que fica em contato, que raramente é a força impulsionadora de fluidos que entram neste concreto. Com isso surgiu o ensaio de absorção de água por sucção capilar de concreto não saturado, onde a face inferior é colocada em contato com a água, sem qualquer tipo de pressão.

NEVILLE (1997) explica que para os concretos leves a permeabilidade é baixa. “Além disso, o suprimento de água pelo agregado possibilita o prosseguimento da hidratação do cimento com uma conseqüente redução da permeabilidade”. Um fato negativo quanto aos vazios dos agregados leves, NEVILLE (1997) cita que estes podem facilitar a difusão do CO_2 , sendo necessário um cobrimento maior da armadura para protegê-la em relação a carbonatação.

LENZI (2001) estudou a permeabilidade de água em argamassas com teores de 0%, 50% e 100% substituição em massa da areia pela cinza pesada. Através dos resultados obtidos, observou-se uma correlação linear do aumento da taxa de absorção capilar com o aumento do teor de substituição.

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos a metodologia proposta foi seguida de acordo com as seguintes etapas:

A – estudo piloto em argamassa padrão confeccionado com a substituição da areia pela cinza pesada;

B – coleta e caracterização dos materiais, para a produção dos concretos;

D – definição dos traços de concreto a serem utilizados;

E – dosagem dos concretos utilizando cinza pesada;

F – realização de testes laboratoriais com os concretos produzidos;

G – elaboração das curvas de dosagens;

H – análise dos resultados.

3.1 Estudo Piloto com Argamassa

Para definir os teores de substituição de areia pela cinza pesada a serem adotados para o estudo em concretos, realizou-se um estudo piloto em argamassa contendo cimento e areia normal, e as substituições de areia normal pela cinza pesada. Comparando-se o desempenho das diferentes argamassas, verificou-se qual substituição da areia pela cinza pesada que poderia ser adotada para a confecção dos concretos, desde que não alterasse negativamente o desempenho em relação às argamassas de referência.

3.1.1 Materiais utilizados

Foram empregados: o cimento CP I-S, a areia normal (IPT), água potável e cinza pesada (retirada de uma esteira de um dos fornos da Usina Termelétrica Jorge Lacerda).

Foram adotados diferentes teores de substituição, 0%, 5%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%.

3.1.1.1.1 Massa Específica dos Materiais

A Tabela 3.1 mostra os resultados médios da massa específica da areia e da cinza pesada.

Tabela 3.1 – Valores de massa específica da areia normalizada e da cinza pesada.

Material	Massa específica (g/cm ³)
Areia normalizada	2,65
Cinza pesada	1,91*

* Cinza pesada utilizada somente no estudo piloto com argamassa.

Nota-se pela Tabela 3.1 que há uma significativa diferença entre as massas específicas da cinza pesada e a areia normal pela qual a primeira irá substituir a segunda. O resultado da razão entre a massa específica da areia normal pela cinza pesada é igual a 1,387; ou seja, a areia normal é 38,7% mais densa que a cinza pesada.

3.1.1.1.2 Análise química da cinza pesada utilizada

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados da análise química da cinza pesada usada no estudo com argamassa.

Tabela 3.2 – Análise química da cinza pesada

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	P.F. %	C org %	CO ₂ t tot %	S %	Cl (ppm)
56,66	27,76	5,32	nd	0,62	0,87	0,23	2,56	1,31	0,10	4,4	3,53	13,52	0,052	83

Nd – não detectado

3.1.2 Dosagens e Produção das Argamassas

Foram testadas argamassas de referência (areia normal e cimento CPI-S) e argamassas com substituição da areia normal por cinza pesada nas proporções de 5%, 15%, 25%, 50%, 75% e 100%. O traço adotado foi de 1:3 (cimento : agregado) em massa. Na substituição, pesou-se a cinza pesada com a umidade em que se encontrava armazenada (41%) e adicionou-se na mistura, ou seja, quando da substituição de 100%, no lugar de 1 kg de areia utilizou-se 1 kg de cinza úmida.

Não se levou em consideração a água presente na cinza no momento de fazer a relação a/c (água/cimento), ou seja, além da água presente nas cinzas foi adicionada água para que todas as argamassas alcançassem uma relação a/c de 0,57.

3.1.3 Ensaio de Consistência “Flow Table”

As argamassas foram submetidas ao ensaio de abatimento na mesa do “flow table” conforme o procedimento descrito a seguir.

Colocava-se o material fazendo-se a mistura da argamassa. Após 3 minutos de mistura numa argamassadeira de bancada, fazia-se o preenchimento do tronco de cone e com algumas batidas laterais fazia-se à acomodação do material. Em seguida retirava-se o tronco de cone e então se verificava o diâmetro médio de espalhamento na mesa de consistência para o número de 5, 10 e 15 de golpes. Os resultados de espalhamento encontram-se a figura 3.1.

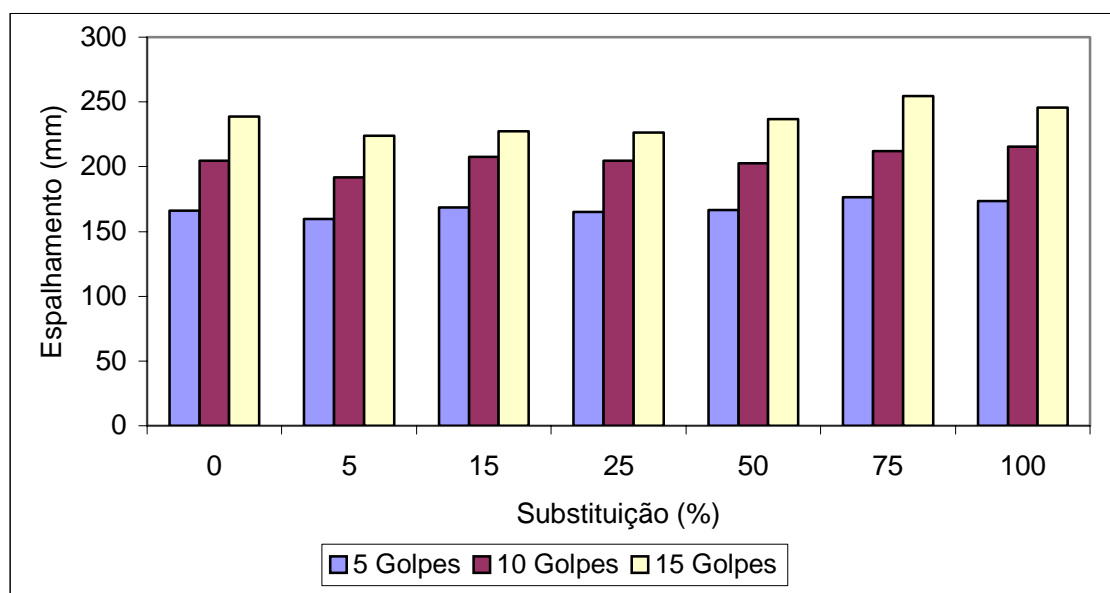


Figura 3.1 – Ensaio de consistência utilizando a mesa do “Flow Table”.

Nota-se pela Figura 3.1 que as argamassas tiveram praticamente a mesma tendência quando submetidas ao ensaio de espalhamento. Com isso as análises de resistência à compressão se tornam mais objetivas, já que o comportamento delas no estado fresco se assemelham.

3.1.4 Moldagem dos Corpos de Prova e Densidade no Estado Fresco

As argamassas foram moldadas em corpos de prova cilíndricos de 5cm x 10cm (diâmetro x altura). Após a leitura de consistência, a argamassa era novamente misturada por um minuto e então se fazia o preenchimento dos corpos de prova em 2

camadas, com adensamento de 60 golpes em 60 segundos em cada camada, na própria mesa utilizada para medir a consistência.

Aproveitando o preenchimento dos moldes, foram medidas as dimensões de cada um e pesados as argamassas dentro deles retirando assim as densidades das argamassas. O resultado apresentado é a média de 7 corpos de prova.

Na Figura 3.2, são apresentados além dos resultados para cada substituição, a evolução da densidade quando do aumento da substituição.

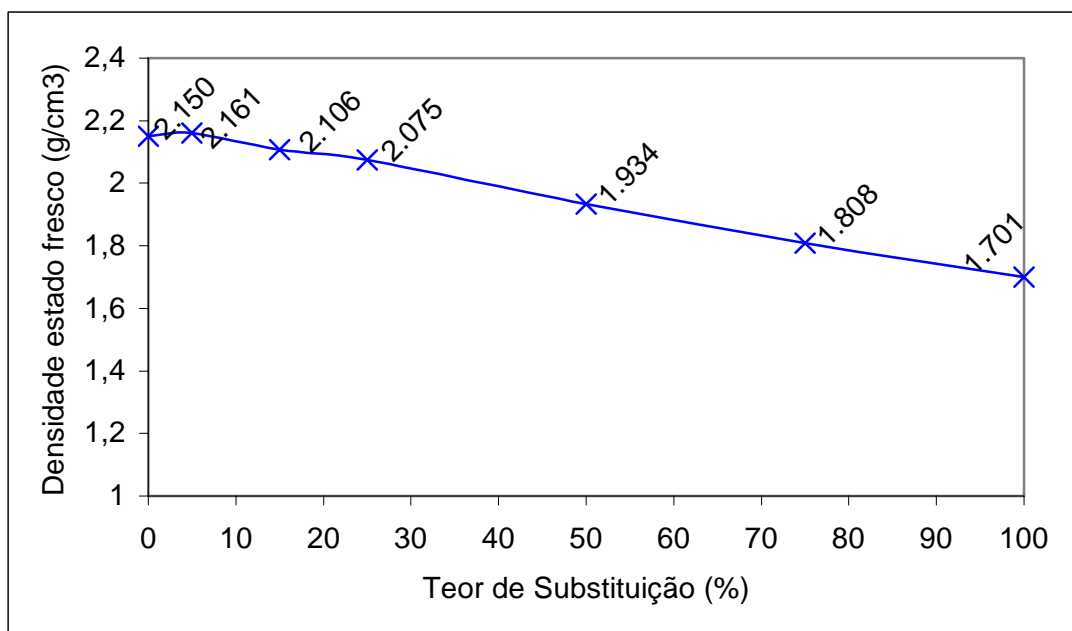


Figura 3.2 – Resultados dos ensaios de massa específica em função dos diferentes teores de substituição.

Observa-se pela Figura 3.2 que a medida em que a areia normal é substituída pela cinza pesada, há uma diminuição da densidade da argamassa. Isso se deve a menor densidade da cinza pesada em relação a areia normal utilizada nas argamassas.

3.1.5 Ensaios de Resistência à Compressão

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de argamassas 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), para avaliação da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de cura.

Decorridos 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e levados a cura em água de cal saturada até momentos antes do ensaio. Para o rompimento dos corpos de prova, eles foram capeados com uma mistura de cimento e enxofre.

Cada valor médio do ensaio de resistência à compressão foi obtido de cada 2 exemplares na idade de 3 e 7 dias, e de 3 exemplares na idade de 28 dias. Os resultados estão demonstrados na Figura 3.3.

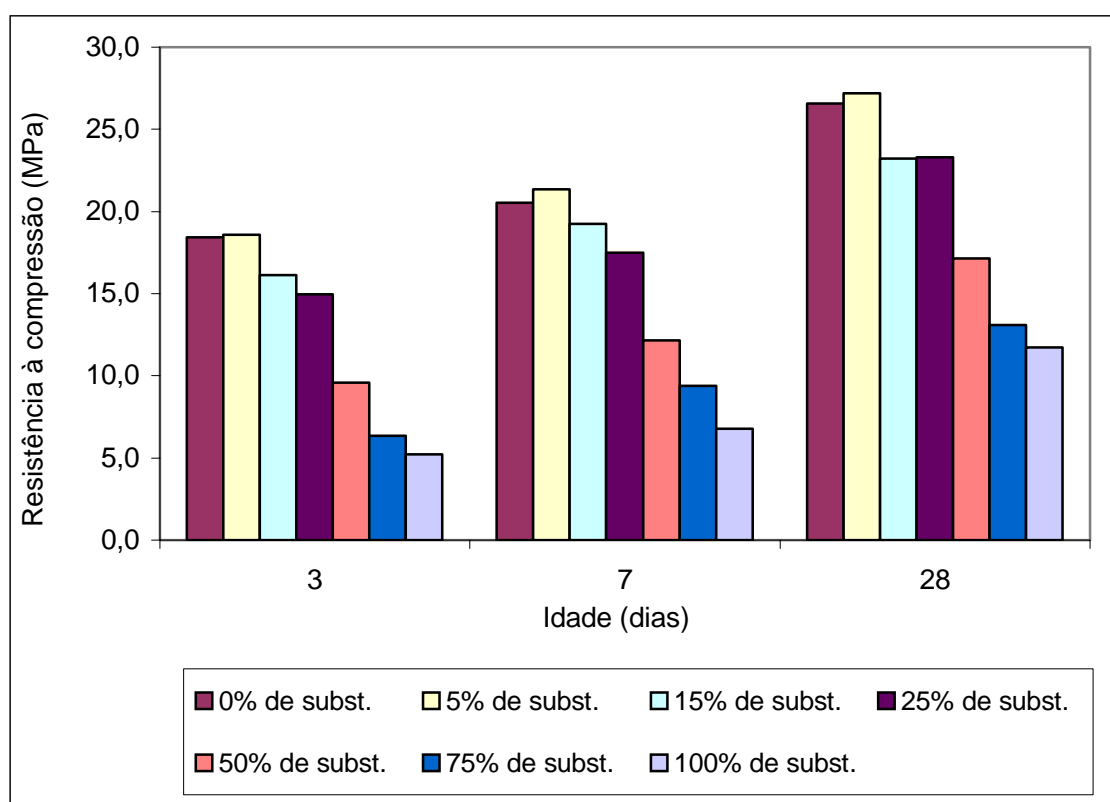


Figura 3.3 – Evolução da resistência à compressão das argamassas.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as porcentagens de resistência à compressão das argamassas confeccionadas com substituição de parte da areia pela cinza pesada, em relação à argamassa de referência.

Tabela 3.3 - Porcentagens de resistências à compressão das argamassas com cinza pesada em relação à argamassa de referência.

% de resistência em relação ao concreto de referência			
% substituição	3 dias	7 dias	28 dias
0	100,0	100,0	100,0
5	100,7	104,0	102,2
15	87,5	93,7	87,3
25	81,1	85,2	87,6
50	51,9	59,3	64,5
75	34,4	45,6	49,2
100	28,4	33,1	44,1

Observa-se pela Figura 3.3 e pela Tabela 3.3, que há um decréscimo na resistência à compressão a medida que aumenta a substituição de areia pela cinza pesada, exceto quando utilizado 5% de substituição. Observa-se também que a resistência até os 25% de substituição fica bem próxima a de referência.

Pela Tabela 3.3 percebe-se que a resistência à compressão das argamassas com maiores teores de substituição, da areia pela cinza pesada, tem um aumento mais significativo quanto maior a idade das argamassas.

Nas argamassas produzidas com os teores de substituição de até 25%, aos 28 dias de idade apresentaram resistências superiores a 75% da resistência atingida com a argamassa de referência.

3.2 *Produção dos Concretos*

3.2.1 **Caracterização dos Materiais**

Para a caracterização dos materiais foram adotados os procedimentos especificados pelas normas técnicas da ABNT, e procedimentos adaptados para melhor avaliação do material estudado.

Vale ressaltar que os materiais empregados para a confecção dos concretos, foram de lotes diferentes daqueles utilizados para a produção das argamassas relatadas anteriormente, com isso as características dos materiais diferem-se.

A caracterização dos cimentos Portland Comum CP I S 32 e Cimento de Alta Resistência Inicial ARI empregados no estudo foi fornecida pelo próprio fabricante (Votoran).

3.2.1.1 *Massa Específica dos Agregados*

Para os ensaios de determinação da massa específica dos agregados graúdos, utilizou-se a NBR 6458/84, enquanto que para a cinza pesada e a areia, os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 9776/87.

3.2.1.2 *Granulometria*

Os ensaios de granulometria de areia e brita, foram realizados de acordo com a NBR 7217/87.

Para a cinza pesada, a composição granulométrica foi obtida segundo dois processos de peneiramento: via seca e úmida. O peneiramento a seco foi realizado conforme especificado para a areia; enquanto que no processo úmido o material (seco em estufa) foi peneirado pela ação da água sobre as partículas.

3.2.1.3 *Material pulverulento*

O material pulverulento é definido como partículas minerais com dimensão inferior a 75 µm, incluindo os materiais insolúveis em água, presentes nos agregados. Os ensaios para a determinação do material pulverulento na areia e cinza pesada foram realizados de acordo com a NBR 7219/87.

3.2.1.4 *Massa Unitária e Inchamento*

A determinação da massa unitária solta da brita, areia e da cinza pesada foi realizada de acordo com o procedimento da NBR 7251 (1982), sendo o material previamente seco em estufa.

O procedimento utilizado para a determinação do inchamento seguiu as especificações da NBR 6467 (1987).

3.2.1.5 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica da Cinza Pesada

O ensaio foi realizado segundo procedimento da NBR 5752 (1992), onde são preparadas duas argamassas: uma de referência no traço de 1:3 constituída somente de cimento Portland; e a outra deve ter 35% do seu volume absoluto de cimento substituído por material Pozolânico (cinza pesada).

3.2.1.6 Perda de Massa ao Fogo

O ensaio de perda de massa ao fogo foi realizado em amostras da cinza pesada. A amostra de 100g da cinza bruta, inicialmente seca em estufa durante 24 horas a uma temperatura de 105°C a 110°C, foi submetida à queima em forno (Mufla Heraeus) ventilado numa temperatura de 1000 °C. Avaliado a perda de massa durante o período de exposição de 2 horas. Após 2 horas de exposição, retirou-se a amostra da mufla e manteve-a em repouso até que as temperaturas do recipiente e da amostra entrem em equilíbrio com a temperatura do ambiente. Depois de estabilizada a temperatura, pesou-se o recipiente com a amostra calcinada.

A porcentagem de perda de massa é dada pela diferença entre a massa inicial da amostra e a massa final da amostra vezes 100.

3.2.1.7 Determinação da Área Específica de Material em Pó

A determinação da área específica da cinza pesada foi realizada mediante o emprego do “permeabelímetro de Blaine” prescrito pela NBR 7224/84.

3.2.1.8 Capacidade de Retenção d’água pela Cinza Pesada

Este ensaio foi realizado segundo a RILEM MR4 (1980) “Water-retention capacity of mortars” destinado ao uso em argamassa. Foi adotado este método de ensaio para a cinza pesada, devido a sua alta absorção de água.

O objetivo do ensaio foi de analisar a influência da cinza pesada nas propriedades do concreto fresco, e analisar o comportamento da cinza pesada quando do acréscimo de água, entretanto sem utilizar aglomerante na mistura.

O ensaio basicamente consiste em colocar a amostra em contato com papel absorvente padronizado e verificar quanto de água o material perde para este papel. Então é calculada a perda desta água, em peso.

3.2.1.9 *Análise Térmica Diferencial da Cinza Pesada*

Este ensaio consiste em registrar as diferenças de temperaturas entre a amostra a ser pesquisada com um material inerte, que na faixa de aquecimento empregado no forno, não ocorre reações exotérmicas ou endotérmicas. Havendo diferenças nessas temperaturas, há o indício de trocas de calor entre o meio e a amostra e com isso há alteração de temperatura lidas nos termopares do aparelho, mostrando um pico no gráfico da diferença de temperatura com o tempo.

Com esse ensaio, é possível registrar alguma alteração físico química no material empregado no estudo.

3.2.2 Definições e Considerações Gerais para as Substituições

O objetivo principal do trabalho é de verificar o desempenho de diferentes traços de concreto utilizando cinza pesada. Segundo análise do projeto piloto feito com argamassa, os melhores resultados alcançados da substituição da areia pela cinza pesada foi através da substituição até o teor de 25%, obtendo-se 88% da resistência à compressão em relação à argamassa de referência, aos 28 dias. Para substituições maiores do que esta houve um decréscimo significativo na resistência à compressão. Por isso os concretos moldados neste estudo tiveram teores de substituição da areia pela cinza pesada (AREIA/CZP) de 0% (referência), 10%, 25%, e 50%.

Apesar da cinza pesada não ser classificada como pozolana, através dos resultados de ensaio de pozolanicidade, decidiu-se fazer a substituição de parte do cimento pela cinza pesada, em teores de 10%, 20% e 30%. A adoção deste critério deve-se ao fato que os cimentos CPI S 32 e ARI, não possuem adições pozolânicas em sua composição, e a necessidade de se avaliar o efeito da cinza pesada na redução dos custos dos insumos utilizados na produção do concreto.

Ressalta-se que, apesar da cinza pesada aparentemente ser muito mais fina que a areia, pela qual estava sendo substituída, não se levou em consideração à diferença da dimensão das partículas dos dois materiais, ou seja, a cinza pesada não substituiu

somente a parcela mais fina da areia. O procedimento que foi adotado visou a simplicidade da operação, já que a separação em diferentes granulometrias ficaria muito trabalhosa e economicamente inviável para uma aplicação em grande escala.

A substituição da areia pela cinza pesada se fez em relação ao volume absoluto, pois a relação entre as massas específicas da areia e da cinza pesada é muito grande. Com isso, foi compensada esta diferença para não aumentar demasiadamente o volume de cinza pesada no concreto em relação a areia que foi substituída.

Devido a cinza pesada ter elevada umidade, inerente a sua extração, manuseio e estocagem, as dosagens realizadas no presente estudo foram sem secagem prévia em estufa, já que o consumo de energia seria muito grande se esta fosse incorporada no estado seco, inviabilizando qualquer emprego a nível comercial. Da mesma forma, a areia empregada também foi usada com a umidade em que se apresentava armazenada. Para o cálculo final do consumo de água ou para a relação água/cimento, a umidade da CZP e da areia foram consideradas.

Outro motivo pelo qual foi utilizado a cinza úmida quando incorporada como areia, deveu-se a possível absorção da água de amassamento pela cinza pesada durante a mistura do concreto, reduzindo assim, a água destinada à hidratação completa do cimento ou ainda provocar perda de trabalhabilidade da mistura, como foi observado por BAZZUCO (1999) quando se incorporaram agregados reciclados secos e obteve perda de abatimento muito maior em relação à incorporação de agregados saturados.

Já, no estudo dos concretos com substituição do cimento pela cinza pesada (CIM/CZP), a cinza pesada foi previamente seca em estufa e a substituição do cimento pela cinza pesada realizada em massa, para facilitar os cálculos de dosagem, já que todos os parâmetros de dosagem relacionam-se a massa de material cimentante, sendo a cinza pesada considerado um material cimentante neste caso.

Os diferentes critérios para as substituições da areia pela cinza pesada e do cimento pela cinza pesada foram devido aos seguintes fatores:

- quando da substituição da areia pela cinza pesada: se a substituição fosse feita em massa, haveria o acréscimo de um volume muito grande de “agregados finos” e com isso alteraria o consumo de cimento por

metro cúbico e conseqüentemente reduziria consideravelmente a resistência à compressão dos mesmos, sendo difícil a comparação;

- quando da substituição do cimento pela cinza: a substituição ocorreu em relação a massa, pois isso facilita no momento do cálculo dos traços e sendo que o consumo por metro cúbico de material cimentício, não se altera consideravelmente. Outro fator relevante levado em conta foi o baixo poder cimentante da cinza pesada e com isso a necessidade de maior quantidade de cinza para tentar compensar a substituição do cimento.

3.2.3 Escolha dos Tipos de Cimento a Serem Utilizados

Os cimentos utilizados foram: o cimento Portland comum CPI-S e o cimento Portland de alta resistência inicial - ARI. Ressalta-se que ambos cimentos apresentam pouca ou nenhuma adição de material pozolânico (máximo 5%).

A intenção da utilização do cimento CPI-S foi de analisar a influência da cinza pesada no ganho de resistência em idades tardias, maiores que 28 dias, ou seja, se a sua adição tem alguma parcela no ganho de resistência a compressão dos concretos devido à atividade pozolânica.

Já para o cimento ARI, o objetivo principal foi de verificar a influência da cinza pesada na resistência à compressão nas primeiras idades (3 e 7 dias), já que este tipo de cimento é empregado para se obter altas resistências nas primeiras idades. Além do mais é um cimento que libera maior quantidade de Hidróxido de Cálcio (CH).

3.2.4 Método de Dosagem dos Concretos

A elaboração dos concretos foi baseada na metodologia de dosagem experimental IPT/EPUSP, também conhecido como método dos quatro quadrantes, baseado no ajuste de curvas de resistência e trabalhabilidade do concreto em função dos materiais disponíveis, no entanto houve algumas particularidades como descrito abaixo.

Conforme o método, primeiramente foi confeccionado um concreto com traço piloto com **m=5,0** (sendo; m→kg de agregado total por kg de cimento), sendo este

intermediário entre um traço de concreto pobre ($m=6,5$) e um traço de concreto rico em cimento ($m=3,5$).

O traço piloto foi ajustado até atingir um teor de argamassa ideal (α_i) capaz de proporcionar a melhor trabalhabilidade e coesão, assim como um bom envolvimento da brita nas misturas, para um abatimento preestabelecido, fixado no presente estudo para $80\pm 10\text{mm}$, sendo este, medido no do tronco de cone, segundo NBR – 7223/92.

Após determinação do teor α para os concretos com $m=5$, adotou-se para os concretos com $m=3,5$ e $6,5$ o mesmo teor de argamassa. No caso dos concretos com substituição da areia por cinza pesada, após calcular o α e o m para os concretos de referência (0%), calculou-se o teor de argamassa α e o traço m para as substituições, onde estes podem ser considerados “equivalentes”, ou seja, para o mesmo volume de areia adicionou-se o mesmo volume de cinza pesada. Esta troca teve a finalidade de não alterar a relação cimento : agregado (em volume) dos concretos, possibilitando ter uma comparação mais fidedigna entre todos os concretos, pois se a areia fosse substituída por peso haveria um maior volume de agregado quanto maior fosse a substituição pela areia prejudicando a comparação.

Segundo HELENE e TERZIAN (1992), o acerto do teor da argamassa é uma fase importante do estudo de dosagem, pois determina a adequabilidade do concreto quando lançado na fôrma. A falta de argamassa acarreta porosidade no concreto ou falhas de concretagem. O excesso proporciona um concreto de melhor aparência, mas aumenta o custo por metro cúbico como, também o aumento de fissuração por origem térmica e por retração por secagem.

A variação nos teores de cimento possibilitou a construção de diagramas de dosagens, relacionando: a resistência à compressão em relação a a/c ; o traço em massa seca (m) em relação a a/c ; o consumo de cimento por metro cúbico em relação ao traço.

Após ajuste dos traços, foram confeccionados corpos-de-prova e ensaiados quanto à resistência a compressão nas idades fixadas. Com os resultados foram traçadas as curvas de Abrams, Lyse e Molinari.

3.2.5 Mistura dos materiais

As misturas dos diferentes concretos foram realizadas em betoneiras de eixo inclinado com capacidade de mistura de 60 litros. Devido às condições de dosagem (acerto da quantidade de água, medidas do slump test), o tempo de mistura foi de 10 minutos.

A seqüência de colocação dos materiais na betoneira foi: brita, 70% da água, areia, cimento, cinza pesada (quando usada) e o restante da água até que atingisse o abatimento desejado.

Destaca-se que concretos tiveram relações água/cimento diferentes, já que o ajuste da água foi feito para que estes atingissem a consistência (slump test) de 80 ± 10 mm.

Nas Tabelas 3.4 e 3.5 estão mostrados os diferentes concretos confeccionados no presente estudo.

Tabela 3.4 – Concreto com substituição da areia pela cinza pesada.

Tipo de cimento	Traço	Substituição AREIA/CZP			
CPI-S	m=3,5	0%	10%	25%	50%
	m=5,0	0%	10%	25%	50%
	m=6,5	0%	10%	25%	50%
CPV ARI	m=3,5	0%	10%	25%	50%
	m=5,0	0%	10%	25%	50%
	m=6,5	0%	10%	25%	50%

Tabela 3.5 – Concreto com substituição do cimento pela cinza pesada.

Tipo de cimento	Traço	Substituição CIM/CZP			
CPI-S	m=3,5	0%	10%	20%	30%
	m=5,0	0%	10%	20%	30%
	m=6,5	0%	10%	20%	30%
CPV ARI	m=3,5	0%	10%	20%	30%
	m=5,0	0%	10%	20%	30%
	m=6,5	0%	10%	20%	30%

3.2.6 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

A moldagem e cura dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738/94. Os corpos de prova de concreto foram confeccionados em fôrmas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, e moldados em duas camadas adensadas com vibrador de imersão.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova eram então retirados das fôrmas, e então imersos em um tanque com uma solução de água e cal, a uma temperatura de 21 ± 4 °C para a cura.

Foram confeccionados 42 concretos diferentes, sendo moldados 20 corpos de prova para cada um destes, totalizando assim 840 corpos de prova.

3.2.7 Avaliação dos Concretos no Estado Fresco

3.2.7.1 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

Também conhecido como ensaio do Slump Test, é um dos principais parâmetros de moldagem para a dosagem segundo o método do IPT/EPUSP. Através dele ajusta-se a quantidade de água a ser adicionada ao concreto para obtenção de uma trabalhabilidade constante para todos os concretos. O ensaio foi realizado conforme procedimento da NBR 7223/92.

3.2.7.2 Ensaio de Perda de abatimento

A perda de abatimento pode ser definida como a perda de fluidez do concreto com o passar do tempo. Ela ocorre quando a água livre de uma mistura é consumida pelas reações de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e também por evaporação.

Este ensaio foi realizado após o ajuste do teor de argamassa.

Os ensaios para a determinação da perda de abatimento foram baseados na NBR 10342 (1992). Para a realização do ensaio a norma cita a utilização de uma sala climatizada; entretanto durante o presente estudo não havia este meio, então se realizou o ensaio à temperatura e umidade relativa do ar, sendo monitorado tais variáveis.

No momento da mistura foram registradas as temperaturas do cimento e da água.

3.2.7.3 Ensaio de Massa Específica dos Concretos no Estado Fresco

Os ensaios de massa específica foram realizados antes da moldagem dos corpos de prova de concreto. O ensaio foi realizado segundo a NBR 9833/87.

3.2.8 Avaliação dos Concretos no Estado Endurecido

3.2.8.1 Ensaios de Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (1994). Foi utilizada a prensa hidráulica do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC, da marca Shimadzu, sendo a carga controlada por microprocessador com taxa de carregamento constante de 0,45 MPa/s e igual para todos os corpos de prova ensaiados.

Foram medidas, para cada concreto confeccionado, as resistências à compressão aos 3, 7, 28, 90 e 180 dias de idade de cura do concreto. Também foi testada a resistência à compressão, aos 365 dias, os concretos com substituição de areia por cinza pesada confeccionadas com cimento ARI.

O número de amostras retiradas teve como base a amostragem múltipla seqüencial, de onde a amostra inicial era de 3 corpos de prova, mas que era acrescida de mais uma amostra quando o coeficiente de variação do ensaio fosse superior à 7%. Através deste procedimento diminui-se a possibilidade de ter valores espúrios e aumentou-se a confiabilidade do resultado obtido. Destaca-se que de todas as médias obtidas no trabalho, somente três resultados espúrios de resistência à compressão foram retirados, sendo estes valores retirados de grupos de quatro exemplares ensaiados para obter uma média.

Devido à alta resistência dos concretos dosados com $m=3,5$; o procedimento de preparação dos topos dos corpos de prova de concreto submetida ao ensaio de resistência à compressão foi modificado para idades acima de 7 dias. LARRARD (1994) afirma que a argamassa de enxofre quando submetidos a esforços acima de 35 MPa começam a ter problemas de escoamento. Com isso, os resultados de resistência à compressão dos concretos poderão ser menores e dispersos. Já NEVILLE (1997) cita que o capeamento com argamassa de enxofre é satisfatório para concretos com resistência de até 100 MPa. NEVILLE (1997), afirma também que **“o material de capeamento não deve influenciar a carga de ruptura do corpo de prova. Por essa razão é preferível esmerilhar os topos”**.

Como no Laboratório de Materiais da Construção Civil - LMCC não disponibiliza de uma máquina para esmerilhar os corpos de prova e visando amenizar os problemas, decidiu-se utilizar serra diamantada para serrar os topos dos corpos de prova eliminando as saliências, para então proceder o capeamento com argamassa de enxofre. Dessa forma, mesmo se a argamassa de enxofre tivesse resistência à compressão menor que a do concreto, a concentração de carga ficaria bastante amenizada. A seqüência de operações encontra-se demonstrado na Figura 3.4.

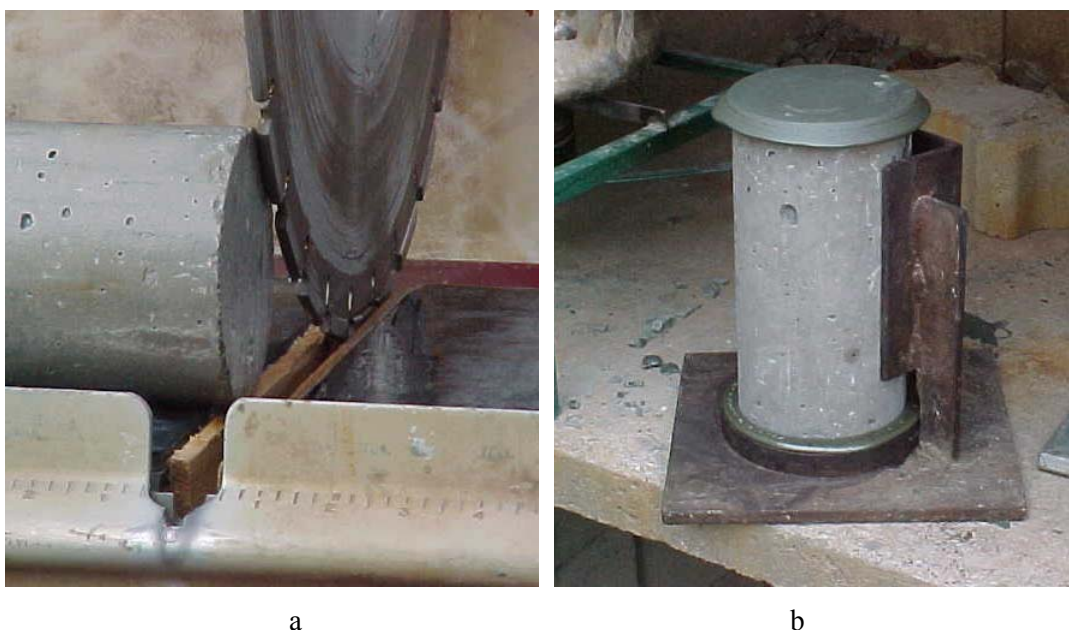


Figura 3.4 – Seqüência de tratamento de faces para o rompimento dos corpos de prova. a) Serragem b) Capeamento

3.2.8.2 *Ensaio de absorção de água por capilaridade*

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados segundo a NBR 9779 (1987). Foram utilizados 3 corpos de prova para cada tipo de concreto. A norma define absorção de água por capilaridade de argamassa ou de concreto endurecido pela expressão: $C=(A-B)/S$, onde C é a absorção de água por capilaridade; A é a massa do corpo de prova que fica em contato com a água durante um determinado período; B é a massa do corpo de prova seco em estufa ventilada, à temperatura de $40\pm 5^{\circ}\text{C}$ (durante um período de 15 dias) e S é a área da seção transversal da superfície em contato com a água (área da seção molhada).

Também foi determinado o coeficiente de absorção capilar, que é a declividade do trecho linear da curva de absorção de água *versus* a raiz quadrada do tempo.

A norma NBR 9779 (1987) não fixa as idades para a realização do ensaio. Com isso, foram realizados os ensaios de absorção capilar na idade de 210 dias para todos os concretos.

A superfície inferior dos corpos de prova, que ficavam em contato com a lâmina de água durante o ensaio, foram cortados com a serra diamantada. Os restantes das superfícies (superior e lateral) ficaram em contato com o ar, sem sofrer qualquer tipo de tratamento, tais como a impermeabilização das mesmas. As leituras foram feitas após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h depois de colocadas em contato com a lâmina d'água.

Neste ensaio, os corpos de prova foram colocados dentro de uma caixa de isopor apoiados em grades, sendo que a temperatura da água foi controlada com termostato, como mostra a Figura 3.5. Na execução do ensaio, a caixa ficava com umidade relativa de 100%.



Figura 3.5– Esquema montado para o ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.2.9 Determinação do Consumo de Cimento

Para o cálculo do consumo de cimento, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$C = \gamma / (1 + a_m + a_i + p + a/c)$$

Onde:

γ = massa específica do concreto

a_m = kg de agregado miúdo (areia) por kg de cimento;

a_i = kg de Cinza Pesada seca por kg de cimento;

p = kg de agregado graúdo por kg de cimento;

a/c = relação a/c.

Na relação a/c, foi levado em conta a umidade presente na cinza pesada e na areia no momento da confecção dos concretos.

3.2.10 Confecção dos Diagramas de Dosagem Segundo Método do IPT/EPUSP

Para o diagrama de dosagem de concreto IPT/EPUSP, descritos por HELENE e TERZIAN (1992), são montados diagramas que levam em conta as leis de comportamento segundo as leis de Abrams (1º quadrante), Lyse (2º quadrante) e Molinari (3º quadrante).

A lei de Abrams (1º quadrante do diagrama de dosagem) admite que a resistência de um concreto é inversamente proporcional à sua relação água/materiais cimentícios. A curva onde se relaciona a resistência à compressão com a sua relação água/cimento é denominada de curva de Abrams.

A lei de Lyse (2º quadrante do diagrama de dosagem) enuncia que, para um mesmo abatimento de tronco de cone, desde que mantido o tipo e graduação dos agregados e o teor de argamassa, mantém constante a relação água/materiais secos (H). Partindo daí, o método admite que a relação entre a variação do traço (m) em função da relação água/cimento permanece.

A lei de Molinari relaciona o consumo de cimento por metro cúbico com o traço utilizado para os concretos.

3.2.11 Análise da Durabilidade dos Concretos

3.2.11.1 Ensaio de Permeabilidade

Uma maneira de se avaliar a durabilidade é através de formas indiretas como o transporte de fluídos através do concreto.

O ensaio escolhido para avaliar esta propriedade foi o ensaio de absorção de água por capilaridade, descrito no item 3.2.8.2.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em seguida são apresentados e analisados os resultados laboratoriais obtidos durante a pesquisa, englobando desde a caracterização dos materiais até a análise dos custos de produção dos concretos.

4.1 Caracterização dos Materiais

4.1.1 Cimento

As características dos cimentos segundo a empresa produtora, estão mostradas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características dos cimentos empregados no estudo

Tipo de cimento		CPI-S	CP V - ARI
ENSAIOS FÍSICOS	UNID.		
Peneira 200	%	1,20	0,11
Peneira 325	%	7,97	1,28
Blaine	m ² /kg	385	411,2
Água consistência	%	29,1	31,0
Início de pega	Hs/min	3:06	2:58
Fim de pega	Hs/min	4:18	3:58
Expansão a quente	mm	0,83	0,88
Resistência 1 dia	MPa	18,97	22
Resistência 3 dias	MPa	26,80	34,7
Resistência 7 dias	MPa	30,50	40,4
Resistência 28 dias (mês anterior)	MPa	39,02	47,7
Massa Específica	g/cm ³	3,14	3,12
ENSAIOS QUÍMICOS	UNID.		
Perda ao Fogo	%	2,71	3,38
SiO ₂	%	18,93	18,65
Al ₂ O ₃	%	4,89	4,4
Fe ₂ O ₃	%	2,79	2,62
CaO	%	59,45	60,81
MgO	%	6,13	4,77
K ₂ O	%	1,32	-
Na ₂ O	%	0,04	-
SO ₃	%	3,23	3,12
Resíduo Insolúvel	%	1,38	0,81

4.1.2 Cinza Pesada

A cinza pesada empregada no presente estudo é proveniente da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, especificamente da unidade C de produção de energia, de onde são lançadas na bacia somente a cinza pesada desta unidade. A coleta foi efetuada com uma retroescavadeira diretamente na bacia como mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Coleta da cinza pesada empregada no estudo.

Devido à dificuldade em entrar na bacia para se coletar o material para o estudo, a cinza foi retirada de dois pontos intermediários entre o ponto de desemboque da cinza na bacia e o lado oposto da bacia, sendo a amostra representativa da produção da usina.

4.1.2.1 Área Específica da Cinza Pesada

A cinza pesada apresentou área específica média de $117\text{m}^2/\text{kg}$, medido através do permeabelímetro de Blaine. O resultado passou um pouco do limite recomendado pela NBR 7224 (1984), no entanto os resultados foram satisfatórios para o presente estudo.

4.1.2.2 *Análise Térmica Diferencial - ATD*

A Figura 4.2 mostra o termograma de uma amostra de cinza pesada utilizada no estudo. Esta amostra foi previamente seca em estufa a 100°C e peneirado previamente em uma peneira de malha de 150 μm .

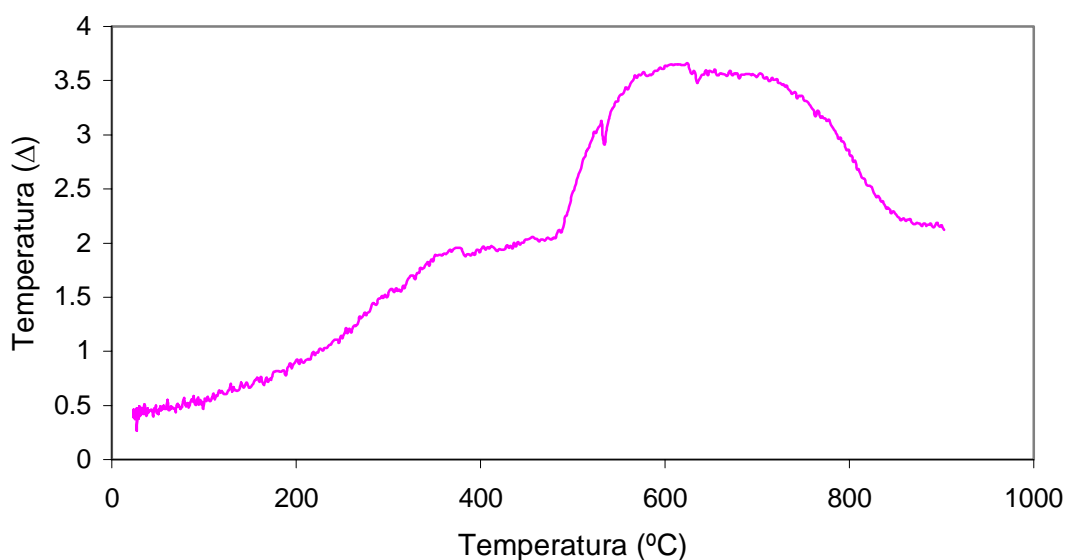


Figura 4.2 - Termograma da cinza pesada

No termograma detecta-se um pequeno pico endotérmico, acidente na temperatura 570°C, provavelmente devido a presença do quartzo na cinza pesada.

4.1.2.3 *Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV*

A seguir, na Figura 4.3, está mostrada a micrografia da cinza pesada utilizada na confecção dos concretos.

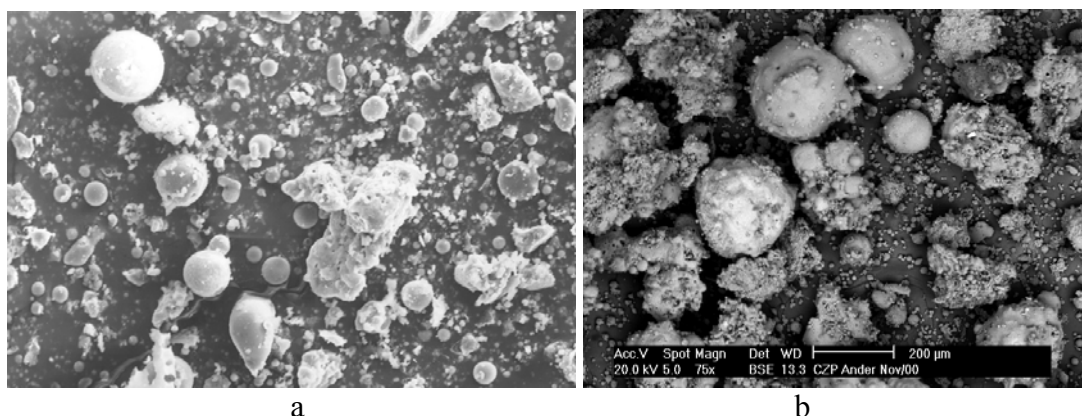


Figura 4.3 – MEV da cinza pesada utilizada nos concretos. a) logo após a coleta na bacia b) armazenado durante 1 ano a uma umidade em torno de 45%.

Pela Figura 4.3 observa-se que a maioria das partículas são irregulares com grande microporosidade, a qual absorvem grande quantidade de água. No entanto, na cinza pesada analisada logo após a coleta, observa-se a presença de várias partículas esféricas com superfície lisa, já na cinza armazenada durante um ano com alto teor de umidade, nota-se a predominância de partículas bastante irregulares. Por isso, recomenda-se um estudo mais aprofundado para obter mais dados conclusivos sobre o armazenamento da cinza pesada, a fim de não causarem prejuízos a morfologia das partículas.

4.1.2.4 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica da Cinza Pesada

Segundo ensaio realizado, de acordo com a NBR 5752 (1992), o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) alcançado pela cinza pesada atingiu um IAP de 58,4%, por este critério não se pode considerar a cinza pesada, utilizada no presente estudo, como pozolana, já que o mínimo de IAP para ser considerado pozolana é de 75 %.

4.1.2.5 Perda de Massa ao Fogo e Massa Específica

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores médios de perda ao fogo e massa específica, determinada para a cinza pesada utilizada na confecção dos concretos.

Tabela 4.2 – Valores de perda ao fogo e massa específica para a cinza pesada.

Perda ao fogo (%)	Massa específica (g/cm ³)
2,11	1,813

Para a determinação da massa específica, tomou-se cuidados especiais quanto a formação de bolhas dentro do balão picnômetro, realizando-se a fervura deste material

para que estas bolhas fossem expulsas. Outro problema foi a presença de material suspenso na água, que possivelmente fazia parte das plerosferas presentes no material. Devido a presença reduzida deste material, não foi considerado no cálculo.

4.1.2.6 Determinação do “Material Pulverulento” presente na cinza pesada

Determinou-se a porcentagem de material pulverulento contido na cinza pesada realizado segundo a NBR 7219 (1987). Chegou-se ao valor médio de 23,7% da cinza pesada que passa na peneira de abertura 0,075 mm.

4.1.2.7 Caracterização Granulométrica da Cinza Pesada

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 estão os resultados da composição granulométrica da cinza pesada, utilizado na confecção dos concretos, segundo a utilização de dois processos diferentes de peneiramento: a seco e úmido.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica da cinza pesada pelo processo de peneiramento a seco.

Peneira (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
2,4	1,36	1,00	0,54	0,40	1	0
1,2	3,33	3,17	1,33	1,27	2	2
0,6	9,42	8,86	3,77	3,54	6	5
0,3	23,74	22,69	9,50	9,08	15	14
0,15	71,41	72,18	28,56	28,87	44	43
Fundo	140,74	142,10	56,30	56,84	100	100
Total	250,00	250,00				

Tabela 4.4 – Composição granulométrica da cinza pesada pelo processo de peneiramento úmido.

Peneira (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
1,2	4,34	2,82	0,87	0,56	1	1
0,6	13,69	21,46	2,74	4,29	4	5
0,3	59,09	65,03	11,82	13,01	15	18
0,15	201,05	193,18	40,21	38,64	56	56
0,075	72,04	108,76	14,41	21,75	70	78
Fundo	105,76	108,75	21,15	21,75	100	100
Total	500,00	500,00				

A Figura 4.4 mostra as curvas granulométricas das amostras de cinza pesada segundo o peneiramento a seco e úmido.

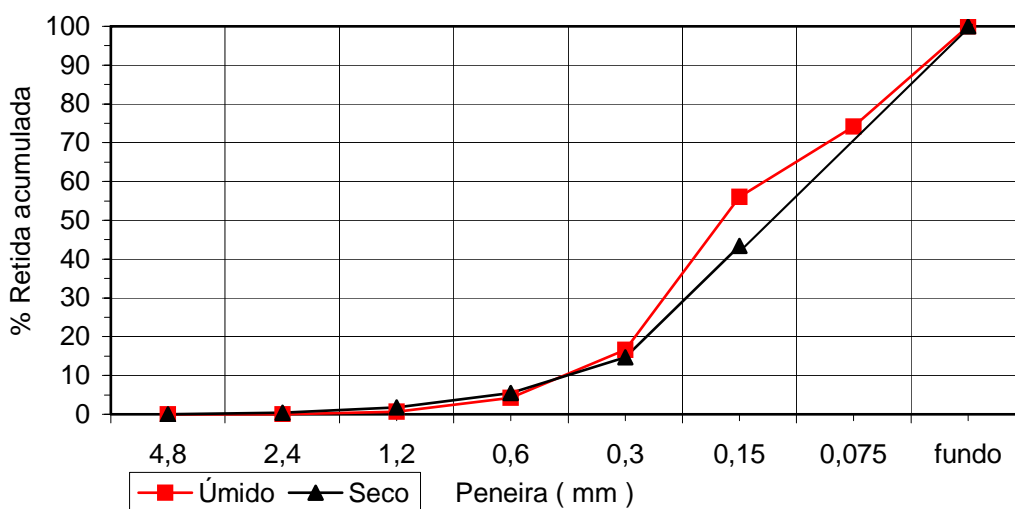


Figura 4.4 – Curvas granulométricas da cinza pesada.

Suspeitava-se que, usando o peneiramento a seco, haveria a presença de “grumos” (várias partículas aderidas entre si) de cinza no material seco, e com isso estes não passariam na peneira pelo simples peneiramento. Já com o peneiramento via úmida, estes grumos teriam maior facilidade de dissolver-se e, com isso, haveria uma certeza maior quanto ao ensaio. No entanto, pelo gráfico da Figura 4.4, nota-se que não foi exatamente isso que aconteceu, pelo contrário, com o peneiramento via seca, houve maior quantidade de material passante nas diferentes peneiras, sendo, portanto o

peneiramento a seco um processo a se considerar para a caracterização das cinzas pesadas.

Por outro lado, nota-se o peneiramento adotado para a caracterização das areias não é válido para a caracterização das cinzas pesadas, já que a quantidade de material passante nas peneiras inferiores é significativa, tendo a necessidade de adotar outras peneiras com diâmetros menores de 0,15 mm.

4.1.2.8 Capacidade de Retenção d'água pela Cinza Pesada

A Figura 4.5 mostra a evolução da capacidade de retenção de água em relação à umidade presente na amostra de cinza pesada.

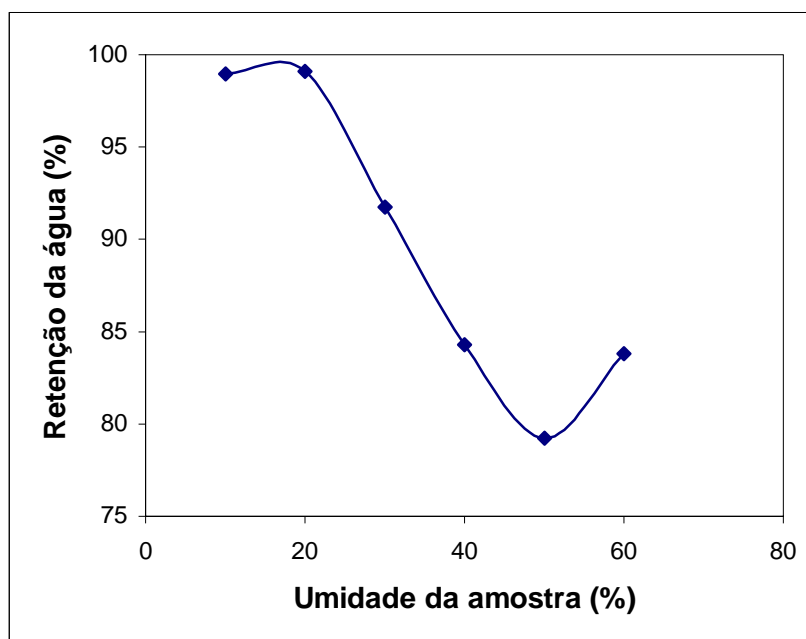


Figura 4.5 – Retenção de água em relação à umidade presente na amostra.

Nota-se pela Figura 4.5 que quanto maior o teor de umidade da amostra menor é a capacidade de retenção de água. Este fato foi constatado até um teor de umidade da amostra em torno de 50%.

4.1.3 Areia e Brita

4.1.3.1 Caracterização Granulométrica da Areia

A Tabela 4.5 mostra os valores da composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa.

Tabela 4.5 – Composição granulométrica da areia na produção dos concretos

Peneira (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
4,8	10,3	16	0,69	1,07	1	1
2,4	119,8	136,4	7,99	9,09	9	10
1,2	473,8	492,2	31,59	32,81	40	43
0,6	376,4	373,9	25,09	24,93	65	68
0,3	335,3	323,9	22,35	21,59	88	89
0,15	134,6	116,5	8,97	7,77	97	97
Fundo	49,8	41,1	3,32	2,74	100	100
Total	1500	1500				

A areia utilizada apresentou módulo de finura médio de 3,04. De acordo com os limites granulométricos da NBR 7211 (1983), a areia encontra-se na zona 4 (grossa). As dimensões máxima e mínima características ficaram em 2,4 mm e < 0,15 mm respectivamente.

A Figura 4.6 mostra as curvas granulométricas de diferentes amostras da areia.

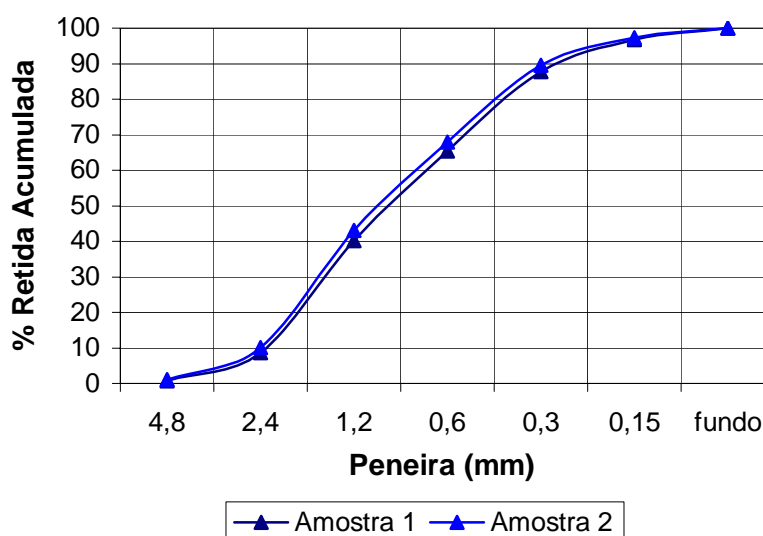


Figura 4.6 – Curvas granulométricas da areia

4.1.3.2 Caracterização Granulométrica da Brita

A Tabela 4.6 mostra a composição granulométrica do agregado graúdo utilizado na produção dos concretos.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado na produção de concretos.

Peneira (mm)	Massa Retida(g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
19,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
12,5	2252,00	2385,50	45,15	47,79	45	48
9,75	1518,80	1528,80	30,45	30,63	46	78
6,35	947,30	884,00	18,99	17,71	95	96
4,75	114,20	115,90	2,29	2,32	97	98
Fundo	155,90	77,70	3,13	1,56	100	100
Total	4988,20	4991,90				

O agregado graúdo utilizado apresentou módulo de finura médio de 6,44. De acordo com os limites granulométricos da NBR 7211 (1983), o agregado graúdo é de graduação 1. As dimensões máxima e mínima característica ficaram em 19 mm e 4,75 mm respectivamente.

A Figura 4.7 mostra a curva granulométrica da brita utilizada no concreto.

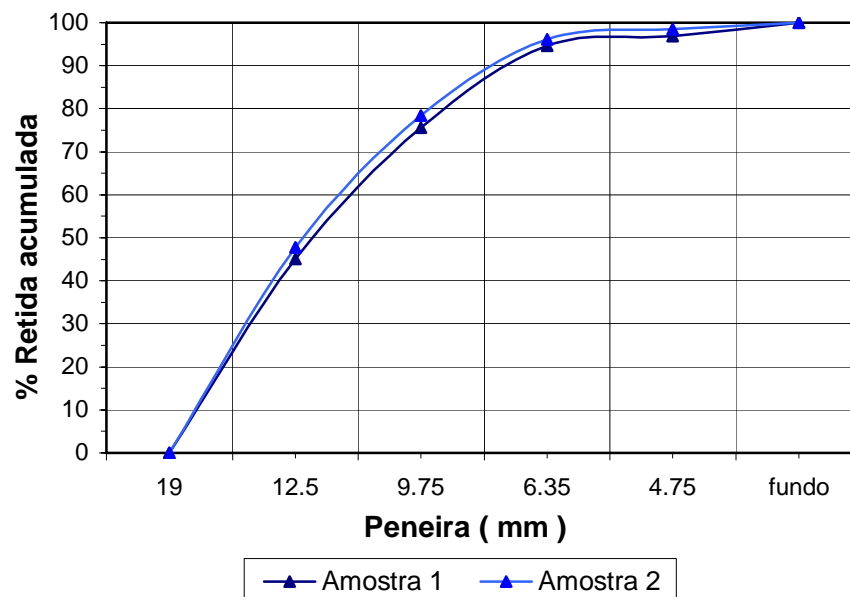


Figura 4.7 – Curvas granulométricas do agregado graúdo.

4.1.3.3 *Massa Específica da Areia e Brita*

Tabela 4.7 – Valores médios de massa específica da areia e agregado graúdo.

Material	Média
Areia	2,605
Agregado graúdo	2,742

O valor médio encontrado para a massa específica da areia e da brita está dentro da média dos valores normalmente utilizados na produção de concretos convencionais da região de Florianópolis.

4.1.3.4 *Material Pulverulento*

Na Tabela 4.8 estão os valores médios de material pulverulento realizados em duas amostras de areia e brita.

Tabela 4.8 – Teor de material pulverulento dos agregados.

Agregado	(%)
Areia	1,65
Agregado graúdo	0,38

A NBR 7211 (1983), fixa os valores de material pulverulento (passante na peneira 0,075mm) em 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e em 5% para os demais concretos. Os agregados empregados estão, portanto, dentro dos limites para ambas as situações.

4.1.3.5 *Índice de Forma dos Agregados Graúdos*

O agregado graúdo foi submetido ao ensaio de índice de forma, conforme a NBR 7809 (1983), chegando ao valor de 2,909 o que classifica os agregados, segundo a mesma norma, em agregado lamelar, pois apresentam relação entre comprimento e espessura superior a 2. O agregado graúdo utilizado na pesquisa está de acordo a norma, apesar de estarem próximos ao limite de utilização, já que pela norma NBR 7211 (1983) os valores limites para o uso em concreto é de 3.

4.1.3.6 Teor de Matéria Orgânica na Areia

Por meio deste ensaio, observou-se que a areia não apresentava níveis de matéria orgânica que poderiam causar algum efeito deletério ao concreto segundo a NBR 7220 (1987), ou seja, o teor ficou abaixo de 300 ppm.

4.1.4 Inchamento da Areia e da Cinza Pesada

Nas Figuras 4.8 e 4.9 encontram-se os gráficos dos traçados das curvas de inchamento da areia e da cinza pesada respectivamente. Na Tabela 4.9 estão os valores de umidade crítica e coeficiente de inchamento médio retirados das duas curvas de inchamento segundo a NBR 6467 (1987).

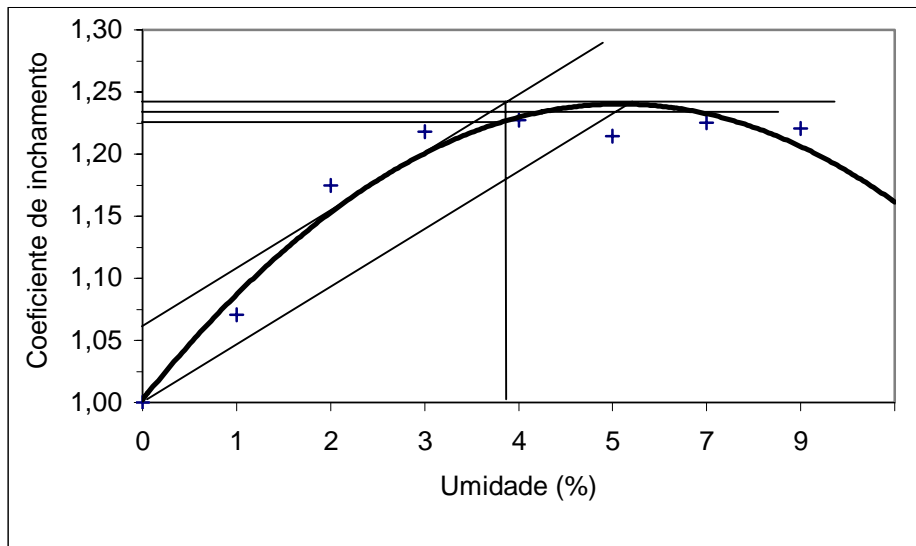


Figura 4.8 – Curva de inchamento da areia utilizada na produção dos concretos

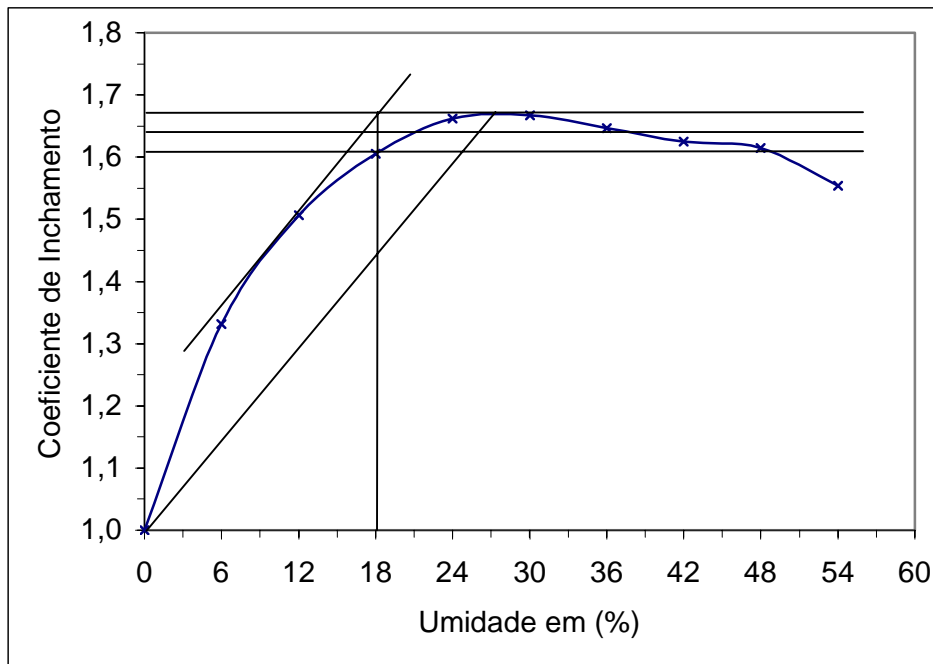


Figura 4.9 – Curva de inchamento da cinza pesada utilizada na confecção dos concretos

Através do ensaio de inchamento notou-se uma retenção excessiva de água pela cinza pesada. Para umidade entre 10% a 40% não se notou nenhuma diferença visual da cinza pesada devido a presença de água.

A curva de inchamento não teve utilidade direta na dosagem dos concretos para o presente estudo. No entanto ela serve para demonstrar que utilizar métodos de dosagens de concretos por volume, utilizando a Cinza Pesada, se torna praticamente inviável, devido a grande variação do volume da Cinza Pesada em função da umidade.

Foi observado na umidade de 54% (última determinação para a confecção da curva de inchamento), que a cinza pesada aparentemente não possuía excesso de água que escorresse entre as partículas.

Tabela 4.9 – Umidade crítica e coeficiente de inchamento médio da cinza pesada e da areia

	Areia	Cinza pesada
Umidade crítica	3,8%	18,2%
Coeficiente de inchamento médio	1,23	1,64

Apesar de não necessitar destes dados de ensaio para o presente trabalho, vale lembrar que estes dados são importantes para o momento de realizar o transporte e/ou

comercialização da cinza pesada, já que o coeficiente de inchamento é um dos fatores determinantes.

4.1.5 Massa Unitária

O ensaio de massa unitária da cinza pesada, brita e areia foi realizado de acordo com a NBR 7251 (1982). Os valores estão mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores da massa unitária da brita e da areia.

	Brita (Kg/dm ³)	Areia (Kg/dm ³)	Cinza pesada (Kg/dm ³)
Amostra 1	1,38	1,49	0,745
Amostra 2	1,40	1,50	0,742
Amostra 3	1,38	1,50	0,735
Média	1,39	1,50	0,741

4.1.6 Análise das Composições Granulométricas de Areia e Cinza Pesada

Foram analisadas para os diferentes teores de substituições da areia pela cinza pesada, as composições granulométricas do conjunto: areia mais cinza pesada; pois como a cinza pesada possui uma granulometria bem mais fina do que a areia, esta vai influenciar no conjunto total da mistura, fazendo com que as combinações entre os dois materiais diminuam o módulo de finura deste conjunto.

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores da composição granulométrica da cinza pesada mais areia para cada teor de substituição da areia pela cinza pesada, juntamente com os limites granulométricos segundo a NBR 7211. Já na Tabela 4.12 estão os valores do módulo de finura.

Tabela 4.11 – Composições granulométricas e limites segundo NBR 7211

	Limites Granulométricos - Segundo NBR 7211 (1983)								Composições			
	Zona 04		Zona 03		Zona 02		Zona 01		0%	10%	25%	50%
Peneiras (mm)	In	Sup	In	Sup	In	Sup	In	Sup	RA	RA	RA	RA
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,3	0	7	0	7	0	7	0	3	0	0	0	0
4,8	0	12	0	11	0	10	0	5	1	1	1	0
2,4	5	40	0	25	0	15	0	5	9	8	7	5
1,2	30	70	10	45	0	25	0	10	42	38	32	21
0,6	66	85	41	65	21	40	0	20	67	60	51	36
0,3	80	95	70	92	60	88	50	85	89	81	70	52
0,15	90	100	90	100	90	100	85	100	97	92	85	73
fundo	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	100	100

In - Limite Inferior Sup - Limite Superior RA - Retido Acumulado

Tabela 4.12 - Módulo de finura e classificação granulométrica das diferentes composições segundo a NBR 7211 (1983).

Composição (AREIA/CZP)	0%	10%	25%	50%
Módulo de finura	3,04	2,81	2,46	1,88
Classificação segundo NBR 7211 (mm)	Zona 4 (grossa)	Zona 03 (média)	Zona 03 (média)	Sem classificação

Nota-se pela Tabela 4.12 que quanto maior o teor de substituição da areia pela cinza pesada, menor é o módulo de finura do conjunto areia mais cinza pesada, isto é devido ao tamanho reduzido das partículas da cinza pesada.

A composição de cinza pesada e areia utilizada apresentou variação quanto ao módulo de finura e também na zona de classificação segundo a NBR 7211 (1983). Apesar dos resultados indicarem uma classificação como areia grossa, observa-se pela Tabela 4.11 que ela está muito próxima da zona 3 (média).

Para as substituições da areia pela cinza pesada nos teores de 10% e 25%, as composições são classificadas como pertencentes à zona 3. Já para a substituição de 50%, o material não se enquadra dentro de nenhuma das zonas prescritas pela NBR 7211 (1983), pois são altas as frações de material passantes nas peneiras 0,3 e 0,15.

No gráfico 4.1 estão apresentadas as distribuições granulométricas para as diferentes composições de cinza pesada mais areia, bem como os limites granulométricos da norma americana ASTM C 33 (1990).

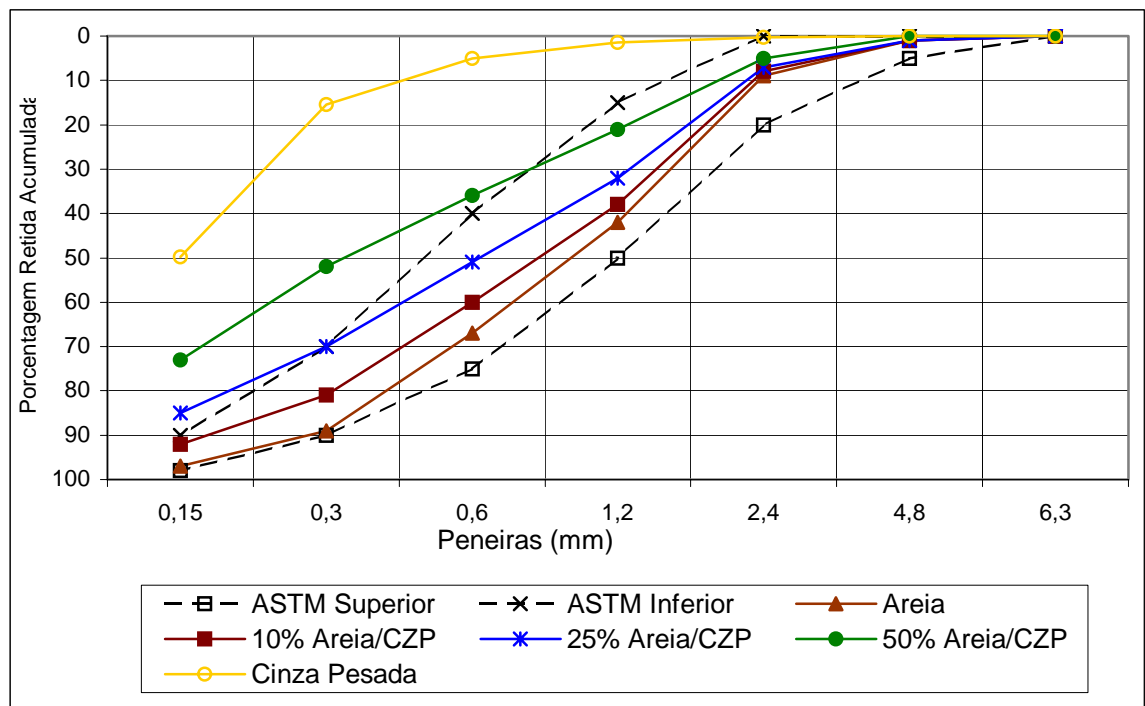


Figura 4.10 –Distribuição das diferentes composições granulométricas juntamente com os limites prescritos pela ASTM C 33 (1990).

Observa-se pela Figura 4.10 que somente a areia e a substituição de 10% da areia pela cinza pesada, apresentam granulometria para concreto segundo ASTM C 33. A granulometria da mistura com substituição de 25%, se aproxima bastante da prescrita pela norma americana, enquanto que para as misturas com substituição de 50%, os valores estão bastante fora da faixa granulométrica recomendadas.

4.2 Concreto no Estado Fresco

Para o estudo dos concretos, partiu-se para a avaliação dos concretos de traço 1:5,0 no estado fresco, para posteriormente a partir das informações coletadas, serem desdobrados dois traços, 1:3,5 e 1:6,5 para cada tipo de substituição.

4.2.1 Relação água/cimento e Trabalhabilidade

Através da Tabela 4.13 pode-se verificar que não houveram diferenças quanto as porcentagens de argamassa “equivalente” dos diferentes concretos quando da substituição da areia pela cinza pesada (AREIA/CZP). Com isso nota-se que a substituição da areia pela cinza pesada em volume foi correta. Pelo aspecto prático,

decidiu-se deixar denominado com o mesmo traço m (utilizado para o concreto de referência) para as diferentes substituições, apesar de que efetivamente o traço m é menor para os concretos com substituição devido a massa específica da cinza pesada ser menor do que a da areia.

Para os concretos com substituição do cimento pela cinza pesada (CIM/CZP), foi necessário aumentar 2% o teor de argamassa, a fim de manter a mesma característica do concreto, quando relacionado ao concreto de referência.

Um dos fatores que pode ter afetado a trabalhabilidade das misturas de concreto, foi a diferença do módulo de finura dos materiais substituídos. Quando houve a substituição AREIA/CZP, o módulo de finura do conjunto diminuiu, com isso há um aumento de coesão da mistura. No entanto, quando se substituiu o cimento pela cinza pesada, o módulo de finura do conjunto aumenta, já que o cimento é significativamente mais fino que a cinza pesada, podendo influenciar negativamente na coesão do material, necessitando com isso um acréscimo da porcentagem de argamassa.

Não foi realizado nenhum ensaio para verificação da coesão dos diferentes tipos de concreto, mas pela análise visual, pôde-se notar uma maior coesão do material quando se substituiu a AREIA/CZP. Já para os concretos CIM/CZP, visualmente notou-se uma menor coesão e com textura mais áspera nos concretos, quando comparados aos de referência.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram o ensaio de abatimento realizado para os diferentes concretos com substituição da areia pela cinza pesada.



a

b

c

Figura 4.11 – Comparação visual dos diferentes concretos AREIA/CZP, com cimento CPI-S e mesmo slump: a) 10% substituição b) 25% substituição c) 50% substituição



a

b

c

Figura 4.12 – Comparação visual dos diferentes concretos AREIA/CZP, com cimento ARI e mesmo slump: a) 10% substituição b) 25% substituição c) 50% substituição

As Tabelas 4.13 e 4.14 mostram o traço, o teor de argamassa ideal (α_i), relação a/c e o valor do abatimento no tronco de cone medido para os concretos AREIA/CZP no momento da confecção dos corpos de prova.

Tabela 4.13 – Traços em massa utilizados nos concretos AREIA/CZP.

Substituição (%)	Traço “equivalente”(m)	Traço Real (m)	Cimento CPI-S				Cimento ARI			
			Cimento	Areia	CZP	Brita	Cimento	Areia	CZP	Brita
0%	m=3,5	3,5	1	1,34	0,00	2,16	1	1,34	0,00	2,16
	m=5,0	5,0	1	2,12	0,00	2,88	1	2,12	0,00	2,88
	m=6,5	6,5	1	2,90	0,00	3,60	1	2,90	0,00	3,60
10%	m=3,5	3,5	1	1,21	0,09	2,16	1	1,21	0,09	2,16
	m=5,0	4,9	1	1,91	0,15	2,88	1	1,91	0,15	2,88
	m=6,5	6,4	1	2,61	0,20	3,60	1	2,61	0,20	3,60
25%	m=3,5	3,4	1	1,01	0,23	2,16	1	1,00	0,23	2,16
	m=5,0	4,8	1	1,59	0,37	2,88	1	1,59	0,37	2,88
	m=6,5	6,3	1	2,18	0,50	3,60	1	2,18	0,50	3,60
50%	m=3,5	3,3	1	0,67	0,47	2,16	1	0,67	0,47	2,16
	m=5,0	4,7	1	1,06	0,74	2,88	1	1,06	0,74	2,88
	m=6,5	6,1	1	1,45	1,01	3,60	1	1,45	1,01	3,60

Tabela 4.14 – Teor de argamassa, abatimento e relação a/c dos concretos AREIA/CZP moldados.

Substituição (%)	Traço “equivalente”(m)	Traço Real (m)	Cimento CPI-S				Cimento ARI			
			Teor de argamassa equivalente (%)	Teor de argamassa Real (%)	Relação a/c	Slump (cm)	Teor de argamassa equivalente (%)	Teor de argamassa Real (%)	Relação a/c	Slump (cm)
0%	m=3,5	3,5	52	52,0	0,43	85	52	52,0	0,48	90
	m=5,0	5,0	52	52,0	0,59	85	52	52,0	0,62	85
	m=6,5	6,5	52	52,0	0,75	80	52	52,0	0,78	95
10%	m=3,5	3,5	52	51,6	0,45	80	52	51,6	0,49	80
	m=5,0	4,9	52	51,4	0,59	85	52	51,5	0,62	90
	m=6,5	6,4	52	51,4	0,75	85	52	51,4	0,77	75
25%	m=3,5	3,4	52	50,9	0,47	80	52	50,9	0,51	85
	m=5,0	4,8	52	50,7	0,64	90	52	50,7	0,68	80
	m=6,5	6,3	52	50,5	0,80	90	52	50,5	0,82	85
50%	m=3,5	3,3	52	49,7	0,54	85	52	49,7	0,56	75
	m=5,0	4,7	52	49,3	0,72	75	52	49,3	0,73	85
	m=6,5	6,1	52	49,0	0,94	80	52	49,0	0,96	85

Nota-se que a medida em que há um aumento do teor de substituição da areia pela cinza pesada, há um acréscimo no consumo de água, isto pode ser explicado pela granulometria da cinza pesada ser bem mais fina em comparação a areia empregada nas misturas.

Observa-se pela tabela 4.15 os traços dos concretos CIM/CZP. Já na tabela 4.16, é apresentado; além da relação água/cimento e a medida do slump; a relação água/(cimento + cinza pesada), já que para este tipo de concreto leva-se em consideração a cinza pesada como material cimentante.

Tabela 4.15 – Traços em massa utilizados nos concretos AREIA/CZP.

Substituição (%)	Traço (m)	Cimento CPI-S				Cimento ARI			
		Cimento	Areia	CZP*	Brita	Cimento	Areia	CZP*	Brita
0%	m=3,5	1	1,34	0,00	2,16	1	1,34	0,00	2,16
	m=5,0	1	2,12	0,00	2,88	1	2,12	0,00	2,88
	m=6,5	1	2,90	0,00	3,60	1	2,90	0,00	3,60
10%	m=3,5	1	1,69	0,11	2,20	1	1,59	0,11	2,30
	m=5,0	1	2,62	0,11	2,93	1	2,49	0,11	3,07
	m=6,5	1	3,56	0,11	3,67	1	3,39	0,11	3,83
20%	m=3,5	1	1,79	0,25	2,59	1	1,79	0,25	2,59
	m=5,0	1	2,80	0,25	3,45	1	2,80	0,25	3,45
	m=6,5	1	3,81	0,25	4,31	1	3,81	0,25	4,31
30%	m=3,5	1	2,04	0,43	2,96	1	2,04	0,43	2,96
	m=5,0	1	3,20	0,43	3,94	1	3,20	0,43	3,94
	m=6,5	1	4,36	0,43	4,93	1	4,36	0,43	4,93

* neste caso a CZP é considerada parte cimentante da mistura.

Tabela 4.16 – Teor de argamassa ideal (α_i), abatimento, relação água/cimento e relação água/(cimento+cinza pesada) dos concretos CIM/CZP moldados.

Substituição (%)	Traço (m)	Cimento CPI-S				Cimento ARI			
		Teor de argamassa (%)	Relação (água/cimento)	Relação água/(cimento+CZP)	Slump (cm)	Teor de argamassa (%)	Relação (água/cimento)	Relação água/(cimento+CZP)	Slump (cm)
0%	m=3,5	52	0,43	0,43	85	52	0,48	0,48	90
	m=5,0	52	0,59	0,59	85	52	0,62	0,62	85
	m=6,5	52	0,75	0,75	80	52	0,78	0,78	95
10%	m=3,5	56	0,54	0,48	90	54	0,55	0,50	90
	m=5,0	56	0,68	0,62	75	54	0,70	0,63	80
	m=6,5	56	0,91	0,82	75	54	0,89	0,80	75
20%	m=3,5	54	0,59	0,47	75	54	0,62	0,49	90
	m=5,0	54	0,79	0,63	80	54	0,81	0,65	80
	m=6,5	54	1,02	0,81	75	54	1,03	0,82	75
30%	m=3,5	54	0,69	0,48	85	54	0,72	0,50	75
	m=5,0	54	0,92	0,64	80	54	0,94	0,66	75
	m=6,5	54	1,16	0,82	75	54	1,15	0,81	85

Nota-se pela Tabela 4.16 que a relação a/c aumentou à medida que se elevou o teor de substituição do cimento pela cinza, sendo que o fator que contribuiu para o aumento desta relação é a alta absorção de água da cinza pesada devido a suas características físicas, que segundo *CHERIAF et al (1999)* há na cinza pesada a presença de partículas de formato irregular e significativa quantidade de partículas ocas como cenosferas e plerosferas que absorvem grande quantidade de água.

Pela análise das Tabelas 4.14 e 4.16, verifica-se que há um consumo maior de água quando se usa o cimento ARI em comparação ao cimento CPIS. Isto pode ser explicado pela menor área específica apresentado por este último cimento. Esta observação é visível tanto nos concretos AREIA/CZP como nos concretos CIM/CZP.

A Figura 4.13 mostra o ensaio de abatimento dos concretos com substituição de 30% do cimento pela cinza pesada. Mais à esquerda, está o concreto confeccionado com cimento CP I-S e à direita o concreto com o cimento ARI.



a

b

Figura 4.13 – Comparação visual dos diferentes concretos CIM/CZP com teores de 30% de substituição a) Com cimento CPI-S b) Com cimento ARI

4.2.2 Ensaio de massa específica dos concretos

Para a determinação da massa específica, utilizou-se um cilindro metálico de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. Os valores apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.18 e também nas Figuras 4.14 e 4.15, são resultados da média de duas determinações.

Tabela 4.17 – Valores da massa específica dos concretos com cinza pesada.

		Massa específica (kg/m ³)			
Cimento	Traço	0%	10%	25%	50%
CP I-S	m=3,5	2,363	2,330	2,291	2,246
	m=5,0	2,325	2,325	2,299	2,218
	m=6,5	2,312	2,297	2,273	2,179
ARI	m=3,5	2,325	2,311	2,268	2,231
	m=5,0	2,325	2,306	2,290	2,203
	m=6,5	2,303	2,299	2,251	2,181

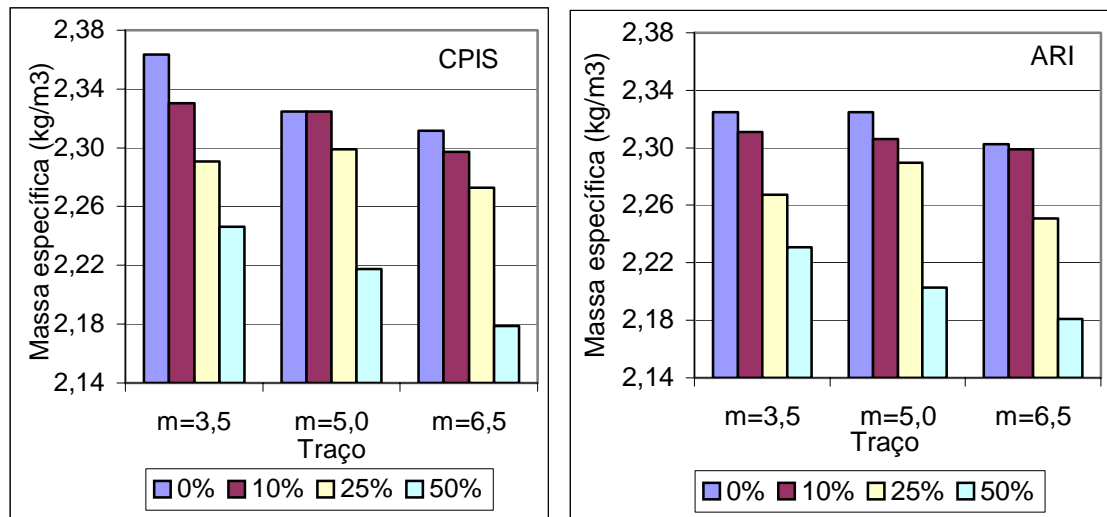


Figura 4.14 – Massa específica dos concretos no estado fresco com substituição da areia pela cinza pesada.

Tabela 4.18 – Valores da massa específica dos concretos elaborados com a substituição parcial do cimento pela cinza pesada.

Cimento	Traço	Massa específica (kg/m ³)			
		0%	10%	20%	30%
CP I-S	m=3,5	2,363	2,295	2,273	2,253
	m=5,0	2,325	2,295	2,273	2,253
	m=6,5	2,312	2,264	2,258	2,242
ARI	m=3,5	2,325	2,275	2,268	2,238
	m=5,0	2,325	2,301	2,266	2,236
	m=6,5	2,303	2,262	2,262	2,229

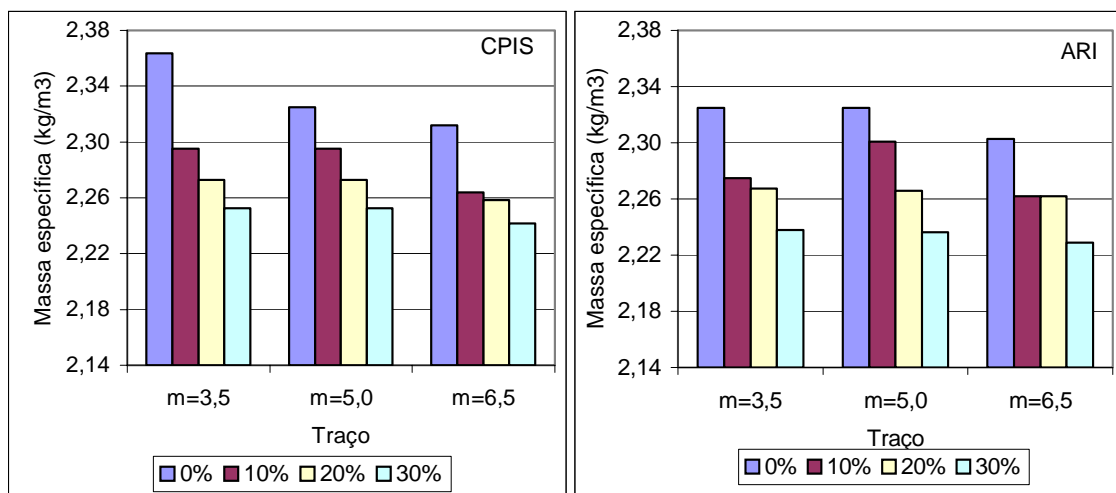


Figura 4.15 – Massa específica dos concretos no estado fresco com substituição do cimento pela cinza pesada.

Pelas análises das Figuras 4.14 e 4.15, observa-se que os concretos produzidos com cinza pesada em substituição à areia e também em substituição aos cimentos, proporcionaram redução na massa específica comparados aos concretos de referência. Isto se deve ao fato de que a massa específica da cinza pesada ser menor do que a da areia ou cimento usados nestes concretos. Para os concretos 50%AREIA/CZP, a redução da massa específica ficou em 5% e para teores de substituição de 30% do cimento pela cinza pesada esta redução foi de 4%.

4.2.3 Verificação da Perda de Abatimento

Para o ensaio de verificação de perda de abatimento foram registradas as temperaturas da água, do cimento e a temperatura ambiente, bem como a umidade relativa do ar. O ensaio foi realizado em concretos com traço $m=5,0$. As leituras da temperatura e umidade relativa do ar tiveram o objetivo de verificar as variações das condições climáticas em que foram realizados os ensaios.

As Tabelas 4.19 e 4.20 mostram os abatimentos obtidos para cada mistura de concreto AREIA/CZP e CIM/CZP, bem como as condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento dos concretos.

Tabela 4.19 – Valores de perda de abatimento para concretos AREIA/CZP traço m=5,0.

Abatimento (mm)								
Tempo de leitura	0% CPIS	0% ARI	10% CPIS	10% ARI	25% CPIS	25% ARI	50% CPIS	50% ARI
0 min	90	75	75	75	85	90	90	90
15 min	70	70	55	70	75	80	90	90
30 min	70	60	55	60	75	75	85	85
45 min	55	55	45	55	70	65	80	80
60 min	50	50	45	55	65	65	80	80
75 min	40	50	45	55	65	65	75	75
90 min	30	35	40	55	55	60	70	75
105 min	30	30	35	45	50	60	60	70
Temp. da água °C	23,2	26,8	24,0	26,9	24,6	25,8	24,9	25,0
Temp. do cimento °C	24,1	24,4	24,5	23,0	25,1	26,2	25,5	23,7
Temp. média do ambiente °C	25,8	27,4	26,0	27,3	26,4	27,5	25,1	24,7
Umidade relativa média do ar (%)	70,0%	61,0%	73,4%	67,5%	76,1%	73,8%	74,0%	73,5%

Tabela 4.20 – Valores de perda de abatimento para concretos CIM/CZP, com traço m=5,0.

Abatimento (mm)								
Tempo de leitura	0% CPIS	0% ARI	10% CPIS	10% ARI	20% CPIS	20% ARI	30% CPIS	30% ARI
0 min	90	75	70	75	70	70	75	75
15 min	70	70	60	65	60	60	60	70
30 min	70	60	55	55	60	50	60	65
45 min	55	55	45	45	45	50	55	60
60 min	50	50	40	50	45	45	55	55
75 min	40	50	35	45	40	45	55	55
90 min	30	35	30	35	35	40	50	55
Temp. da água °C	23,2	26,8	20,8	21,2	22,4	22,7	22,5	22,0
Temp. do cimento °C	24,1	24,4	23,2	23,9	23,9	23,9	23,8	24,1
Temp. média do ambiente °C	25,8	27,4	20,9	23,6	22,8	25,8	23,4	27,7
Umidade relativa média do ar (%)	70,0%	61,0%	62,0%	57,4%	75,1%	67,1%	81,5%	63,8%

A NBR 10342 (1992) especifica que os valores de abatimento pelo tronco de cone devem ser realizados até que o concreto atinja 2,0 cm de abatimento ou à critério da obra, no presente estudo foi estabelecido um limite de 90 minutos. Como todos os

valores de abatimento foram maiores que 2,0 até os 90 minutos, os ensaios foram lidos até este período.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram a evolução da perda de abatimento verificada até 90 minutos de mistura. A perda de abatimento demonstrado na Figura 4.16 refere-se a porcentagem de abatimento em relação a primeira leitura de abatimento efetuada.

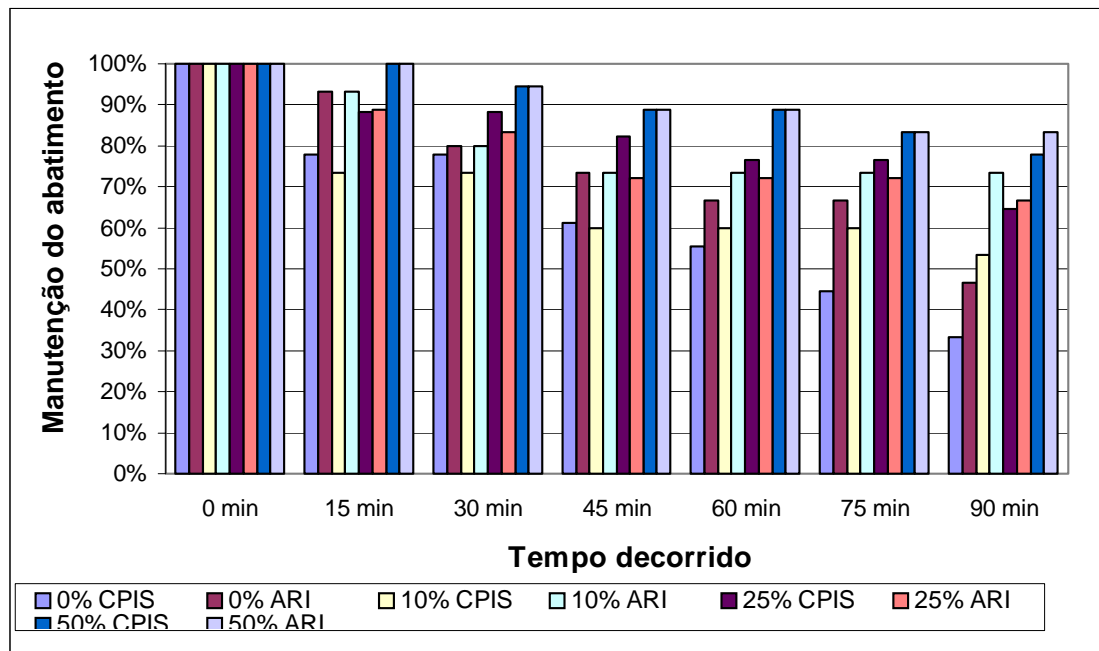


Figura 4.16 – Evolução da perda de abatimento para concretos com AREIA/CZP

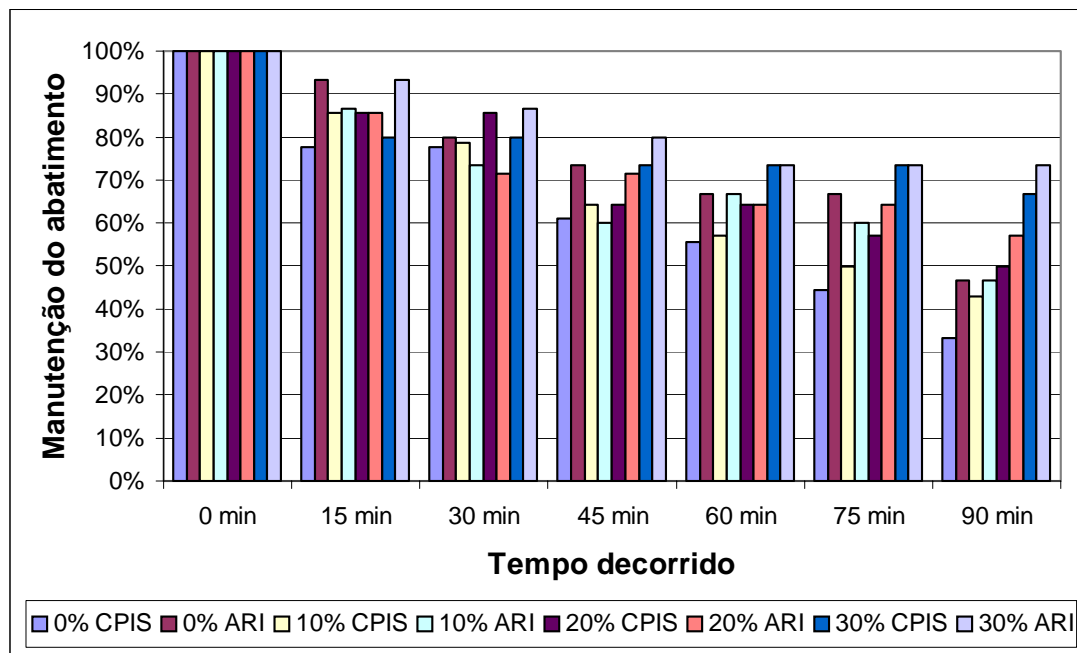


Figura 4.17 – Evolução da perda de abatimento para concretos com CIM/CZP

Comparando-se a perda de abatimento de dois concretos AREIA/CZP, 0% e 50% de substituição, nota-se que no final de 90 minutos, o concreto produzido com 50% de cinza pesada manteve um abatimento aproximado de 80% do valor inicial. Já para o concreto de referência houve perda de 60% no abatimento inicial. Pela Figura 4.16 observa-se uma tendência geral de, quanto maior o teor de substituição, menor é a perda de abatimento. No concreto do tipo CIM/CZP (Figura 4.17) esta tendência é menos acentuada, ou seja, enquanto o concreto de referência mantém 40% do abatimento inicial no final de 90 minutos, os concretos com 30% CIM/CZP o abatimento fica em torno de 70% do inicial.

A perda de abatimento é influenciada pela umidade relativa do ar, ou seja, quanto menor esta umidade maior a perda de abatimento. No entanto a variação no teor de umidade relativa do ar não foi significativa para os ensaios, com isso não foi possível observar qualquer influência nos ensaios realizados. Tomando-se as situações extremas 10% CIM/CZP ARI e 30% CIM/CZP ARI, sendo o primeiro ensaiado com menor umidade relativa, e o segundo com a maior; entre os dois não foi notada qualquer diferença significativa devido a este fator, já que concretos próximos a eles tiveram comportamentos semelhantes.

Quanto a outros fatores que afetam a perda de trabalhabilidade como temperatura ambiente e temperatura dos materiais, estes também não oscilaram significativamente durante a execução dos ensaios, mantendo uma pequena variação nas suas temperaturas.

Tanto para os concretos AREIA/CZP como para os concretos CIM/CZP, nota-se que os concretos onde foi utilizado o cimento ARI, em geral tiveram menores perdas de abatimento que em relação aos concretos confeccionados com cimento CPIS, poderia se estranhar, já que pela maior finura do cimento ARI, eles se hidratariam mais facilmente que o cimento CPIS e com isso teriam uma maior perda de abatimento. No entanto, isso pode ser explicado pela maior relação a/c de todos os concretos confeccionados com cimento ARI em relação aos concretos com CPIS.

A perda de abatimento em relação ao tempo, é menor quanto maior o teor de substituição pela cinza pesada nos concretos, isto pode acontecer devido a liberação de parte da água absorvida no início da mistura pela cinza pesada (partículas ocas), conseqüentemente estaria ajudando a manter a mistura mais fluida em relação às misturas sem a cinza pesada.

4.3 Concreto no Estado Endurecido

4.3.1 Coloração

Apesar da cinza pesada apresentar coloração mais escura que a areia, devido a uma parcela de material incombusto, os concretos de referência e aqueles com adição de cinza pesada, apresentaram colorações semelhantes. Este fato pode ser observado através da Figura 4.18 onde são apresentados da esquerda para a direita: concretos de referência, 10%, 25% e 50% de substituição da areia pela cinza pesada.



Figura 4.18 – Aspecto dos diferentes concretos: referência e com adição de cinza.

4.3.2 Resultados da Resistência à Compressão dos Concretos

Na Figura 4.19 está demonstrada a seqüência de ensaio de resistência à compressão realizado com os corpos de prova.



Figura 4.19 – Seqüência de rompimento dos corpos de prova: a) Corpo de prova sendo carregado b) Corpo de prova após o rompimento.

4.3.2.1 Concreto com Substituição da Areia pela Cinza pesada

Na Tabela 4.21 estão mostrados os valores de resistência à compressão média dos concretos do tipo AREIA/CZP ensaiados e obtidos em laboratório, nas diferentes idades.

Tabela 4.21 – Valores de resistência média dos concretos do tipo AREIA/CZP.

Tipo de Cimento	Substituição AREIA/CZP e traço	Resistência à Compressão (MPa)					
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	365 dias
CPI S	0% m=3,5	29,0	30,3	40,7	49,1	52,1	-
	0% m=5,0	15,3	22,9	28,6	33,4	34,4	-
	0% m=6,5	15,2	21,1	16,8	26,6	29,7	-
	10% m=3,5	35,0	31,3	43,2	52,0	50,3	-
	10% m=5,0	25,1	30,3	35,3	41,1	39,4	-
	10% m=6,5	15,4	15,7	24,3	28,5	29,8	-
	25% m=3,5	32,9	41,3	52,5	52,9	60,9	-
	25% m=5,0	18,4	23,9	28,2	38,1	41,3	-
	25% m=6,5	14,0	17,5	24,0	29,4	32,2	-
	50% m=3,5	30,9	38,3	44,2	44,1	48,2	-
	50% m=5,0	22,3	29,4	36,5	36,7	40,4	-
	50% m=6,5	14,2	21,1	25,7	27,5	30,9	-
ARI	0% m=3,5	23,0	30,0	42,9	55,1	57,4	54,6
	0% m=5,0	22,4	26,0	30,8	36,8	40,0	42,0
	0% m=6,5	16,6	20,2	21,9	28,5	28,8	29,0
	10% m=3,5	34,4	37,0	50,5	58,6	63,0	59,9
	10% m=5,0	26,1	32,3	36,8	39,4	47,0	45,6
	10% m=6,5	21,4	22,4	30,4	32,8	37,8	35,3
	25% m=3,5	34,1	38,3	45,4	51,0	59,6	65,4
	25% m=5,0	25,4	29,4	38,1	47,1	48,5	51,6
	25% m=6,5	19,3	21,1	28,2	33,0	38,3	38,2
	50% m=3,5	30,4	37,8	42,7	53,3	60,6	61,6
	50% m=5,0	23,3	26,1	33,9	40,8	45,9	42,6
	50% m=6,5	14,3	16,9	23,9	29,9	32,4	35,7

A Figura 4.20 mostra um comparativo das resistências dos concretos AREIA/CZP

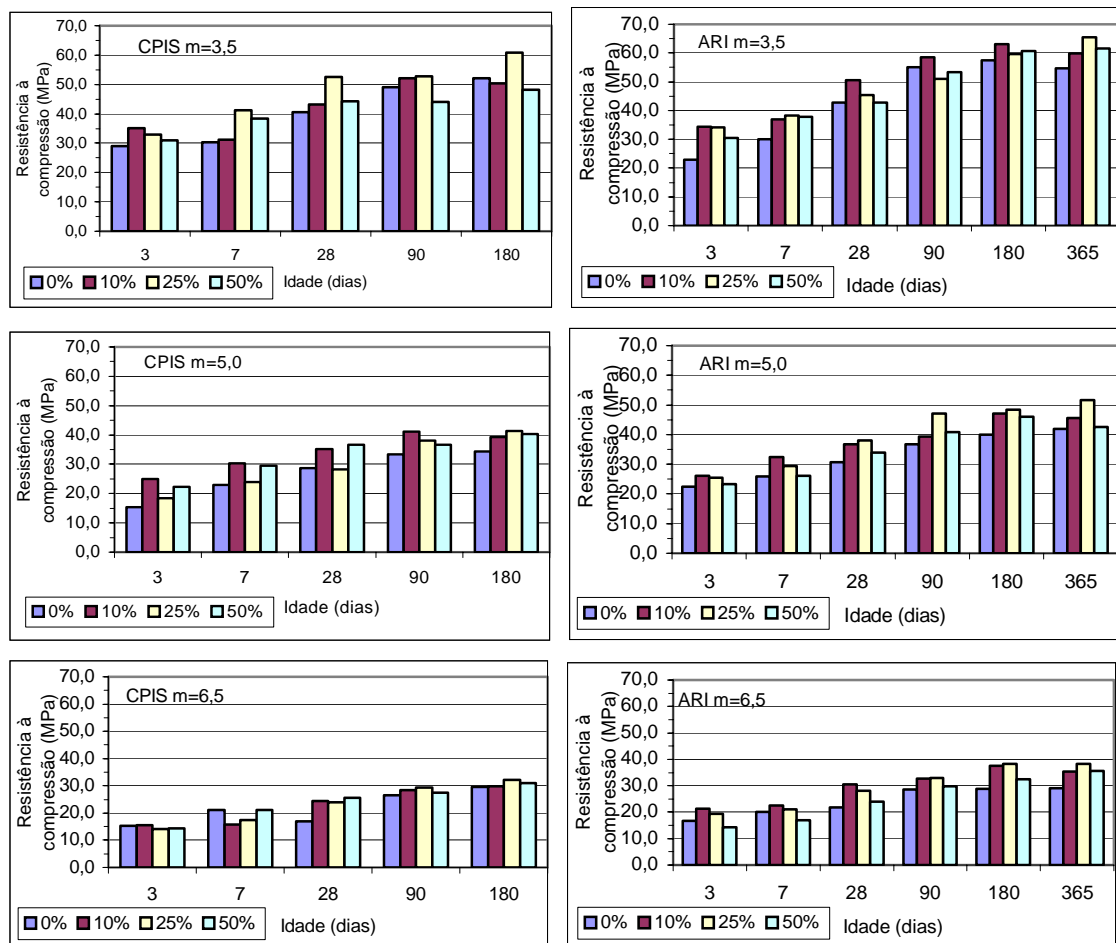


Figura 4.20 - Comparativo entre as resistências à compressão dos diferentes concretos AREIA/CZP.

De modo geral observa-se que as resistências à compressão dos concretos com substituição da areia pela cinza pesada foram similares e até maiores em relação aos concretos de referência (0%), conforme mostrado na Figura 4.20.

Nota-se que o comportamento de resistência dos concretos de referência para os concretos onde houve substituição de areia por cinza pesada, foi o mesmo, tanto para os concretos mais ricos em cimento **1:3,5** quanto para os concretos mais pobres **1:6,5**. Conclui-se que a estrutura interna das partículas de cinza pesada não é mais fraca que as partículas de areia, ou seja, estas não influenciam na resistência final dos concretos, podendo estas serem utilizadas tanto para concretos com alta resistência como também para concretos com baixas resistências.

Observa-se que para os concretos com cimento ARI, nas primeiras idades, os concretos com cinza pesada (10% e 25%) tiveram desempenhos a resistência à compressão maior do que os de referência. Com isso pode-se dizer que este tipo de concreto é apto para ser

utilizado em empresas pré-moldadas, sem prejuízo quanto ao retardo da desforma do material.

Comparando-se os resultados dos concretos 0% e 50%, na Figura 4.20, percebe-se que de um modo geral estes concretos não se diferenciam significativamente quanto aos resultados de resistência à compressão, exceto para os concretos com traço **m=5,0** – CPIS onde o concreto com substituição de 50% apresentou maior resistência à compressão em relação ao de referência, independente da idade do ensaio.

Já os concretos com 10% e 25% de substituição, obtiveram na maioria dos casos, resistências superiores aos concretos com 0% e 50% de substituição. Esta tendência pode ser observada tanto nos concretos confeccionados com cimento ARI como para o cimento CPIS.

Nota-se pela Figura 4.20 que nas idades de até 180 dias, em geral, os concretos AREIA/CZP foram mais resistentes em relação aos de referência. Esta diferença seria maior caso fosse considerado todos os concretos com relação a/c iguais, no entanto para obter esta igualdade teria que ser utilizado aditivos redutores de água, ou moldar concretos com menor trabalhabilidade para os concretos com Cinza Pesada, no entanto o objetivo do trabalho foi a produção de concretos com a mesma trabalhabilidade e sem uso de aditivos.

Esta diferença na resistência pode ser explicada, em parte, pelo efeito filler, ou seja, há um melhor empacotamento entre as partículas nestes concretos, por ocasião da presença de partículas mais finas presentes na mistura, ou seja, há maior número de partículas intermediárias entre as peneiras 0,15mm e 0,075mm. Para os 10% de substituição, a distribuição granulométrica conjunta, da areia mais a cinza pesada, fica compreendida na faixa granulométrica recomendado pela norma ASTM C 33 (1990), enquanto que para a substituição de 25% e 50% as distribuições granulométricas não se encaixam perfeitamente na mesma faixa (ver figura 4.10.).

Nas Tabelas 4.22 e 4.23 são mostradas as porcentagens das resistências à compressão alcançada pelos diferentes concretos (AREIA/CZP) em relação ao concreto de referência nas diversas idades.

Tabela 4.22 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos AREIA/CZP com cimento CPIS em relação aos de referência.

Substituição	% 3 dias	% 7 dias	% 28 dias	% 90 dias	% 180 dias	Média
0% (referência)	100	100	100	100	100	100
10%	126,89	104,04	117,89	111,46	102,84	112,62
25%	109,75	111,31	121,60	109,53	115,66	113,57
50%	113,28	119,52	123,58	99,27	102,84	111,70

Tabela 4.23 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos AREIA/CZP com cimento ARI em relação aos de referência.

Substituição	% 3 dias	% 7 dias	% 28 dias	% 90 dias	% 180 dias	% 365 dias	Média
0% (referência)	100	100	100	100	100	100	100
10%	132,10	120,34	122,07	108,64	117,12	112,10	118,7274
25%	129,35	116,54	116,84	108,89	116,01	123,57	118,5319
50%	109,68	106,04	105,13	102,99	110,06	111,39	107,5464

Não se pode afirmar que a maior resistência a compressão dos concretos com substituição ocorreu devido o efeito pozolânico, pois como mostra as Tabelas 4.22 e 4.23, os concretos de referência e os concretos com substituição possuem praticamente a mesma relação de resistência para as diferentes idades, mesmo para as idades mais avançadas (90, 180 e 365 dias), onde a ação pozolânica poderia estar proporcionando maiores resistências.

4.3.2.2 Concreto com Substituição do Cimento pela Cinza Pesada

Na Tabelas 4.24 estão mostrados os valores de resistência à compressão média dos concretos tipo CIM/CZP nas diferentes idades.

Tabela 4.24 – Valores de resistência média dos concretos tipo CIM/CZP

Tipo de cimento	Substituição CIM/CZP e traço	Resistência à Compressão (MPa)				
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
CPI S	0% m=3,5	29,0	30,3	40,7	49,1	52,1
	0% m=5,0	15,3	22,9	28,6	33,4	34,4
	0% m=6,5	15,2	21,1	16,8	26,6	29,7
	10% m=3,5	31,7	33,9	41,0	46,1	47,0
	10% m=5,0	23,2	26,3	32,3	33,8	33,6
	10% m=6,5	13,4	16,6	20,3	22,6	24,2
	20% m=3,5	26,0	30,0	39,0	47,4	46,6
	20% m=5,0	18,0	21,6	25,4	29,0	29,2
	20% m=6,5	11,3	12,9	16,2	19,7	20,8
	30% m=3,5	18,4	25,2	31,9	39,1	40,0
	30% m=5,0	13,4	17,1	22,1	27,0	28,1
	30% m=6,5	7,7	8,8	13,2	16,2	17,2
ARI	0% m=3,5	23,0	30,0	42,9	55,1	57,4
	0% m=5,0	22,4	26,0	30,8	36,8	40,0
	0% m=6,5	16,6	20,2	20,9	28,5	28,8
	10% m=3,5	29,4	34,8	39,6	45,0	47,2
	10% m=5,0	24,0	27,3	33,5	37,9	39,3
	10% m=6,5	17,3	19,3	24,0	24,6	25,9
	20% m=3,5	24,8	31,1	39,7	42,8	46,7
	20% m=5,0	19,4	23,3	28,6	33,4	33,6
	20% m=6,5	13,5	14,9	17,7	21,3	21,7
	30% m=3,5	22,6	26,2	38,6	42,1	43,9
	30% m=5,0	14,3	17,3	23,2	28,1	28,1
	30% m=6,5	8,7	8,3	12,4	16,1	16,9

A Figura 4.21 mostra um comparativo das resistências à compressão entre os diferentes concretos CIM/CZP

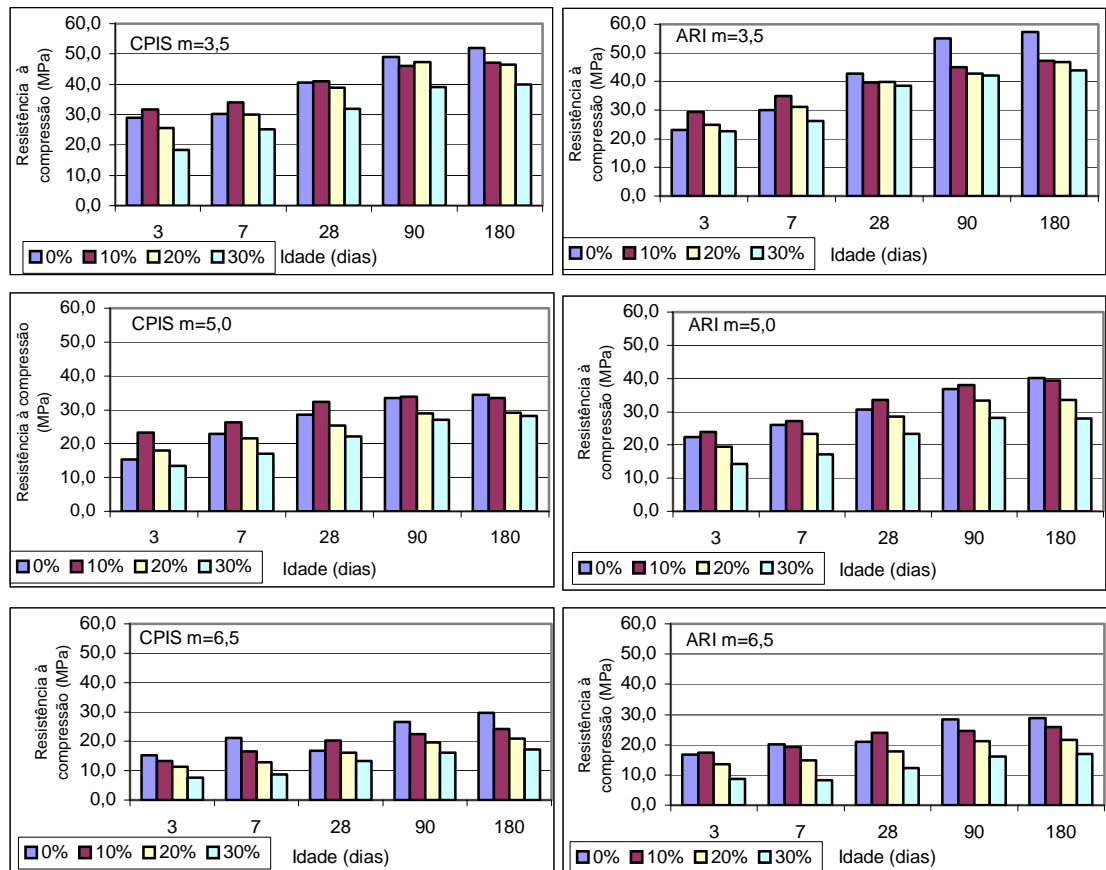


Figura 4.21 - Comparativo entre as resistências à compressão dos diferentes concretos CIM/CZP.

Através da figura 4.21, observa-se que quanto maior o teor de substituição do cimento pela Cinza Pesada menor a Resistência à compressão. No entanto, para 10% de substituição em muitos casos permaneceu com resistências iguais e até superiores ao de referência.

Nas Tabelas 4.25 e 4.26 são mostradas as porcentagens das resistências alcançadas, aos 3, 7, 28 e 90 dias, em relação ao concreto de referência, do tipo CIM/CZP.

Tabela 4.25 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos CIM/CZP com cimento CPIS em relação aos de referência.

Substituição	% 3 dias	% 7 dias	% 28 dias	% 90 dias	% 180 dias	Média
0% (referência)	100	100	100	100	100	100
10%	115,68	103,34	108,60	93,93	90,24	102,36
20%	93,50	86,88	93,52	88,05	83,20	89,03
30%	66,89	68,76	78,06	75,46	73,46	72,53

Tabela 4.26 – Porcentagem média de resistência à compressão atingida pelos concretos CIM/CZP com cimento ARI em relação aos de referência.

Substituição	% 3 dias	% 7 dias	% 28 dias	% 90 dias	% 180 dias	Média
0% (referência)	100	100	100	100	100	100
10%	114,01	106,89	101,68	89,27	89,02	100,18
20%	93,22	90,97	90,12	80,92	80,78	87,20
30%	73,68	68,04	77,73	71,68	70,34	72,29

Nota-se pelas tabelas 4.25 e 4.26, que a evolução nas resistências à compressão para as idades mais tardias (90 e 180 dias) foram mais significativas para os concretos de referência do que para os concretos com substituição, pois as porcentagens de resistências dos concretos com substituição em relação aos de referência vão diminuindo quanto maiores as idades. Um exemplo típico é o concreto de 10%, onde até a idade de 28 dias as resistências eram maiores do que as de referência. Porém para as idades de 90 e 180 dias, as resistências diminuíram e se tornaram menores do que as de referência.

4.3.3 Construção de Curvas de Regressão

A partir das resistências à compressão dos concretos obtidas em laboratório, construiu-se curvas de regressão da resistência em relação à idade mostrado nas Figuras 4.27 e 4.28.

Obteve-se com isso as equações da melhor curva para então calcular as resistências atingidas nas diferentes idades como mostrado nas Tabelas 4.29 e 4.30.

4.3.3.1 Curvas de Regressão para Concretos tipo AREIA/CZP

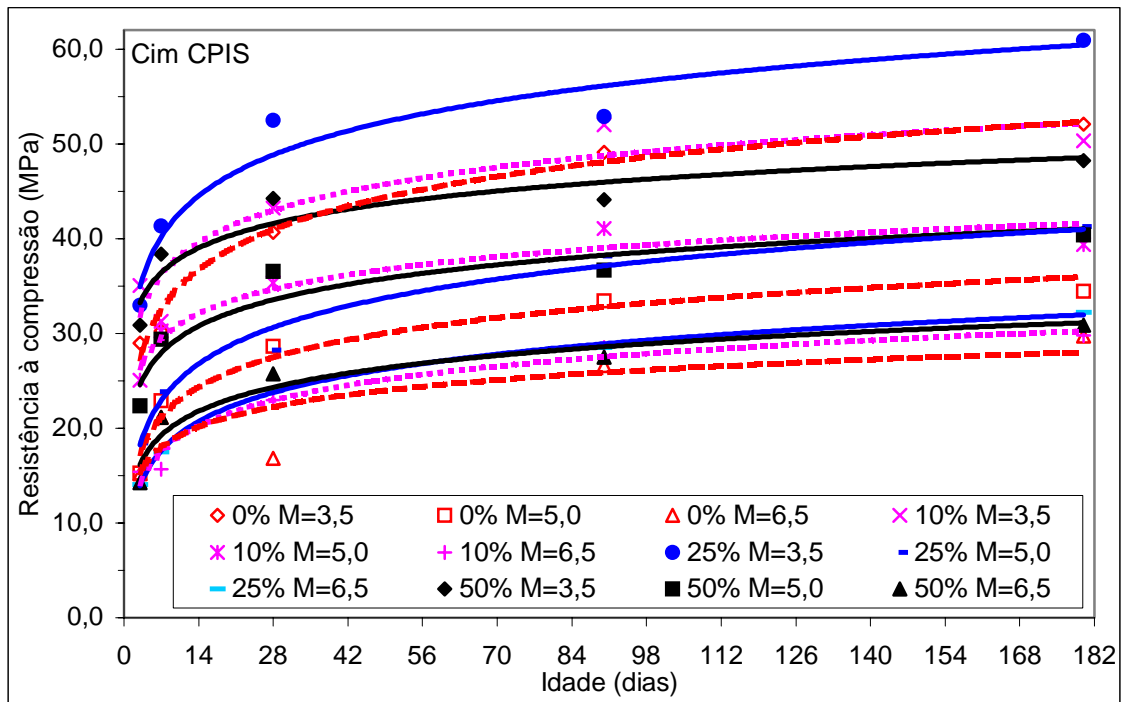


Figura 4.22 – Evolução da resistência à compressão dos concretos AREIA/CZP utilizando cimento CPIS

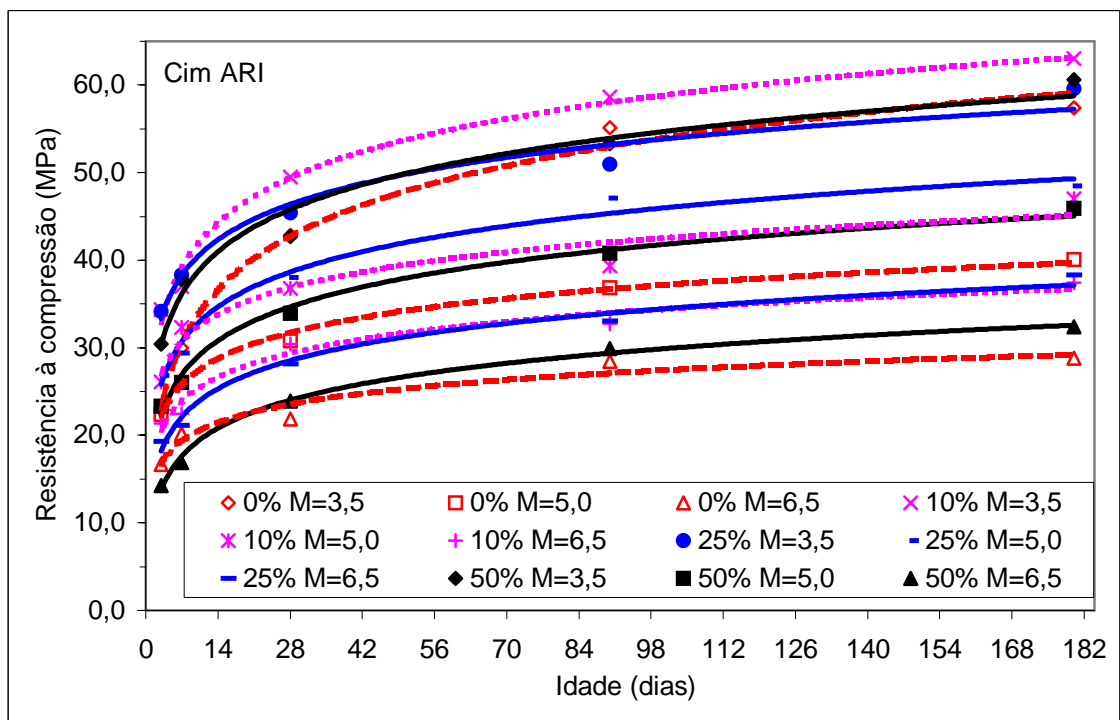


Figura 4.23 – Evolução da resistência à compressão dos concretos AREIA/CZP utilizando cimento ARI

Nas Tabelas 4.27 e 4.28, estão apresentadas as equações das curvas de regressão para os concretos AREIA/CZP com cimento CPIS e ARI. Também estão demonstradas as resistências à compressão para as diferentes idades calculadas a partir das equações.

Tabela 4.27 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos AREIA/CZP com cimento CPIS

Substituição AREIA/CZP e traço	Equação das curvas	Resistência à compressão calculada				
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
0% m=3,5	$y = 6,1111\text{Ln}(x) + 20,578$	27,3	32,5	40,9	48,1	52,3
0% m=5,0	$y = 4,5506\text{Ln}(x) + 12,311$	17,3	21,2	27,5	32,8	35,9
0% m=6,5	$y = 3,0913\text{Ln}(x) + 11,952$	15,3	18,0	22,3	25,9	28,0
10% m=3,5	$y = 4,9567\text{Ln}(x) + 26,451$	31,9	36,1	43,0	48,8	52,2
10% m=5,0	$y = 3,7303\text{Ln}(x) + 22,227$	26,3	29,5	34,7	39,0	41,6
10% m=6,5	$y = 3,9473\text{Ln}(x) + 10,05$	14,4	17,7	23,2	27,8	30,5
25% m=3,5	$y = 6,2332\text{Ln}(x) + 28,063$	34,9	40,2	48,8	56,1	60,4
25% m=5,0	$y = 5,5562\text{Ln}(x) + 12,121$	18,2	22,9	30,6	37,1	41,0
25% m=6,5	$y = 4,5038\text{Ln}(x) + 8,9511$	13,9	17,7	24,0	29,2	32,3
50% m=3,5	$y = 3,7328\text{Ln}(x) + 29,157$	33,3	36,4	41,6	46,0	48,5
50% m=5,0	$y = 4,0218\text{Ln}(x) + 20,146$	24,6	28,0	33,5	38,2	41,0
50% m=6,5	$y = 3,6536\text{Ln}(x) + 12,145$	16,2	19,3	24,3	28,6	31,1

Tabela 4.28 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos AREIA/CZP com cimento ARI

Substituição AREIA/CZP e traço	Equação das curvas	Resistência à compressão calculada				
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
0% m=3,5	$y = 8,824\text{Ln}(x) + 13,293$	23,0	30,5	42,7	53,0	59,1
0% m=5,0	$y = 4,2808\text{Ln}(x) + 17,446$	22,1	25,8	31,7	36,7	39,7
0% m=6,5	$y = 3,0392\text{Ln}(x) + 13,428$	16,8	19,3	23,6	27,1	29,2
10% m=3,5	$y = 7,4143\text{Ln}(x) + 24,862$	33,0	39,3	49,6	58,2	63,4
10% m=5,0	$y = 4,4376\text{Ln}(x) + 22,075$	27,0	30,7	36,9	42,0	45,1
10% m=6,5	$y = 4,0131\text{Ln}(x) + 16,054$	20,5	23,9	29,4	34,1	36,9
25% m=3,5	$y = 5,8355\text{Ln}(x) + 26,941$	33,4	38,3	46,4	53,2	57,2
25% m=5,0	$y = 5,9955\text{Ln}(x) + 18,411$	25,0	30,1	38,4	45,4	49,5
25% m=6,5	$y = 4,639\text{Ln}(x) + 13,073$	18,2	22,1	28,5	33,9	37,2
50% m=3,5	$y = 6,9631\text{Ln}(x) + 22,593$	30,2	36,1	45,8	53,9	58,8
50% m=5,0	$y = 5,5789\text{Ln}(x) + 16,084$	22,2	26,9	34,7	41,2	45,1
50% m=6,5	$y = 4,6017\text{Ln}(x) + 8,6794$	13,7	17,6	24,0	29,4	32,6

4.3.3.1.1 Curvas de Regressão para concretos tipo CIM/CZP

Nas Figuras 4.24 e 4.25 estão apresentadas as curvas de regressão, da resistência em relação à idade para os concretos com substituição do cimento pela cinza pesada.

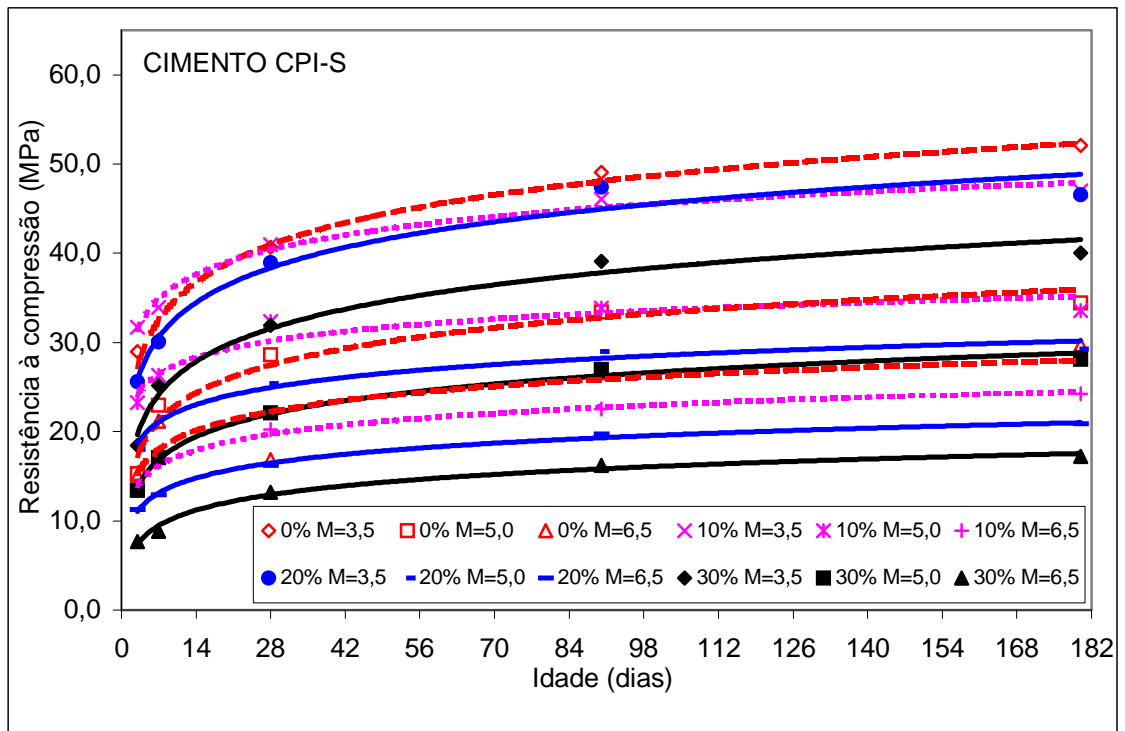


Figura 4.24 – Evolução da resistência à compressão dos concretos CIM/CZP utilizando cimento CPIS.

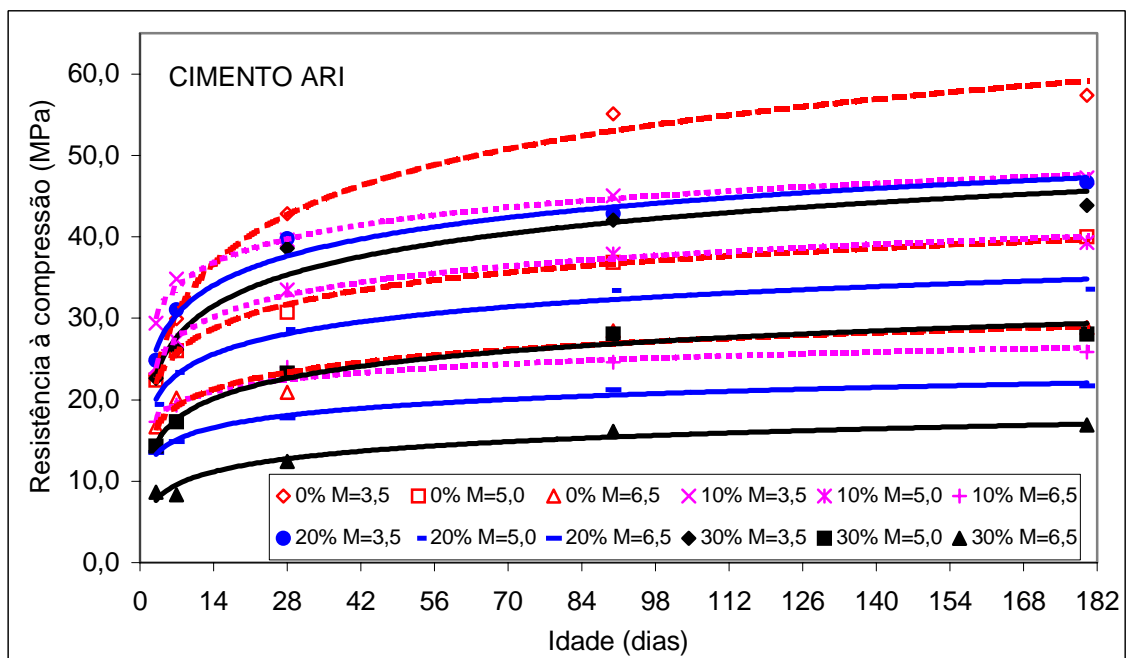


Figura 4.25 – Evolução da resistência à compressão dos concretos CIM/CZP utilizando cimento ARI

Nas Tabelas 4.29 e 4.30, estão apresentadas as equações das curvas de regressão para os concretos CIM/CZP com cimento CPIS e ARI. Também são apresentadas as resistências à compressão para as diferentes idades calculadas a partir das equações.

Tabela 4.29 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos CIM/CZP com cimento CPIS

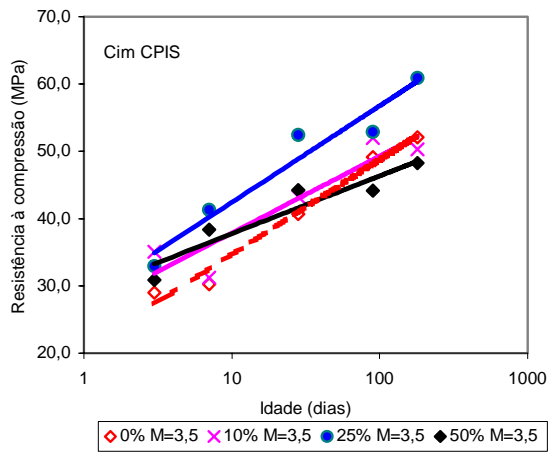
Substituição CIM/CZP e traço	Equação das curvas	Resistência à compressão calculada				
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
0% m=3,5	$y = 6,1111\text{Ln}(x) + 20,578$	27,3	32,5	40,9	48,1	52,3
0% m=5,0	$y = 4,5506\text{Ln}(x) + 12,311$	17,3	21,2	27,5	32,8	35,9
0% m=6,5	$y = 3,0913\text{Ln}(x) + 11,952$	15,3	18,0	22,3	25,9	28,0
10% m=3,5	$y = 4,0341\text{Ln}(x) + 26,977$	31,4	34,8	40,4	45,1	47,9
10% m=5,0	$y = 2,6814\text{Ln}(x) + 21,243$	24,2	26,5	30,2	33,3	35,2
10% m=6,5	$y = 2,5754\text{Ln}(x) + 11,127$	14,0	16,1	19,7	22,7	24,5
20% m=3,5	$y = 5,5488\text{Ln}(x) + 19,963$	26,1	30,8	38,5	44,9	48,8
20% m=5,0	$y = 2,7979\text{Ln}(x) + 15,642$	18,7	21,1	25,0	28,2	30,2
20% m=6,5	$y = 2,4253\text{Ln}(x) + 8,3983$	11,1	13,1	16,5	19,3	21,0
30% m=3,5	$y = 5,344\text{Ln}(x) + 13,769$	19,6	24,2	31,6	37,8	41,5
30% m=5,0	$y = 3,6851\text{Ln}(x) + 9,6972$	13,7	16,9	22,0	26,3	28,8
30% m=6,5	$y = 2,4882\text{Ln}(x) + 4,6304$	7,4	9,5	12,9	15,8	17,6

Tabela 4.30 – Equações das melhores curvas e resistência à compressão obtida através das curvas para os concretos CIM/CZP com cimento ARI

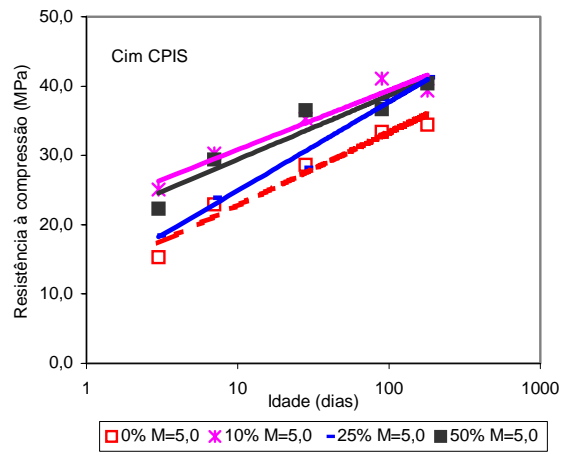
Substituição CIM/CZP e traço	Equação das curvas	Resistência à compressão calculada				
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
0% m=3,5	$y = 8,824\text{Ln}(x) + 13,293$	23,0	30,5	42,7	53,0	59,1
0% m=5,0	$y = 4,2808\text{Ln}(x) + 17,446$	22,1	25,8	31,7	36,7	39,7
0% m=6,5	$y = 3,0392\text{Ln}(x) + 13,428$	16,8	19,3	23,6	27,1	29,2
10% m=3,5	$y = 4,2541\text{Ln}(x) + 25,54$	30,2	33,8	39,7	44,7	47,6
10% m=5,0	$y = 3,8748\text{Ln}(x) + 19,93$	24,2	27,5	32,8	37,4	40,1
10% m=6,5	$y = 2,112\text{Ln}(x) + 15,423$	17,7	19,5	22,5	24,9	26,4
20% m=3,5	$y = 5,1667\text{Ln}(x) + 20,415$	26,1	30,5	37,6	43,7	47,2
20% m=5,0	$y = 3,6043\text{Ln}(x) + 16,083$	20,0	23,1	28,1	32,3	34,8
20% m=6,5	$y = 2,1388\text{Ln}(x) + 10,944$	13,3	15,1	18,1	20,6	22,1
30% m=3,5	$y = 5,5171\text{Ln}(x) + 16,944$	23,0	27,7	35,3	41,8	45,6
30% m=5,0	$y = 3,6185\text{Ln}(x) + 10,574$	14,5	17,6	22,6	26,9	29,4
30% m=6,5	$y = 2,2865\text{Ln}(x) + 5,1333$	7,6	9,6	12,8	15,4	17,0

4.3.4 Correlações

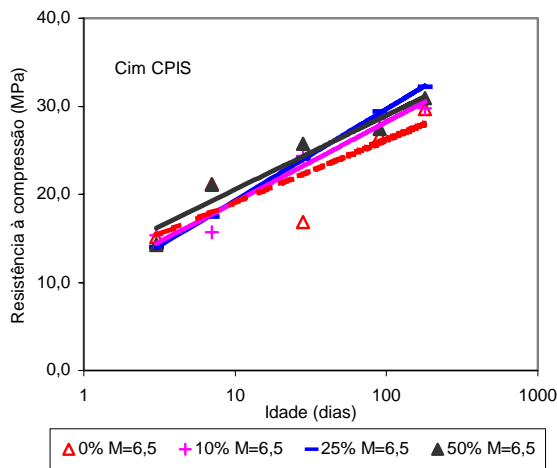
Em seguida, nas Figuras 4.26 e 4.27 são mostradas as equações linearizadas de resistência à compressão em função da idade, dos concretos com substituição da areia pela cinza pesada (Figura 4.26) e da substituição do cimento pela cinza pesada (Figura 4.27).



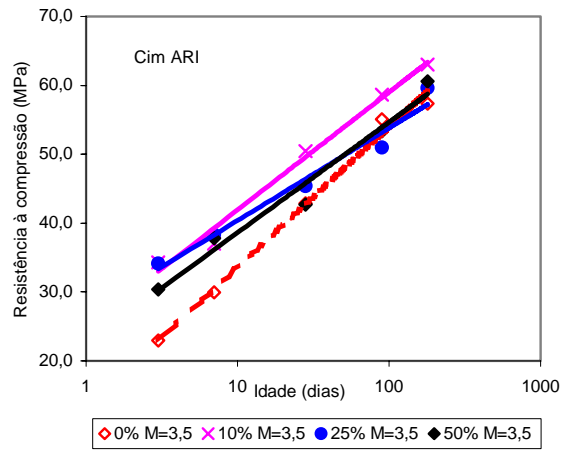
a - Cimento CPIS e traço m=3,5



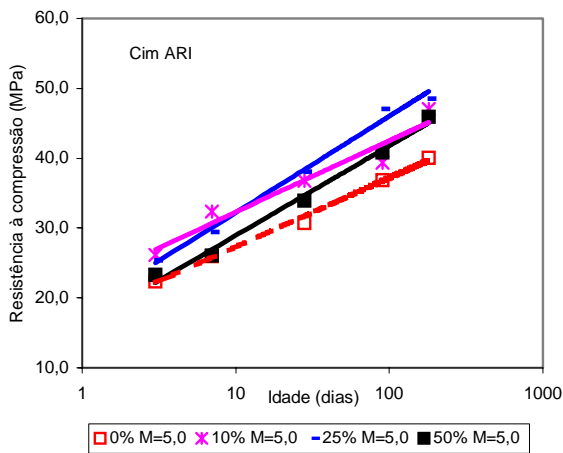
b - Cimento CPIS e traço m=5,0



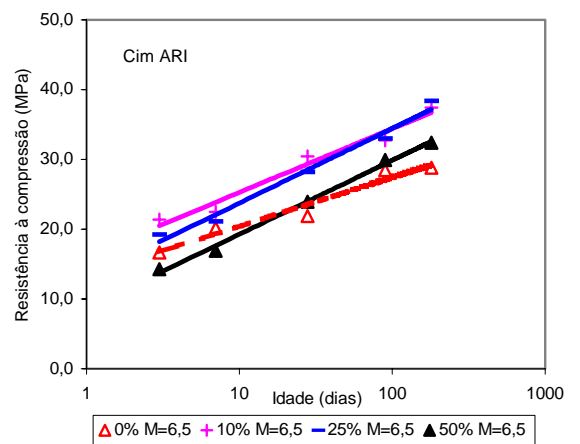
c - Cimento CPIS e traço m=6,5



d - Cimento ARI e traço m=5,0



e - Cimento ARI e traço m=5,0

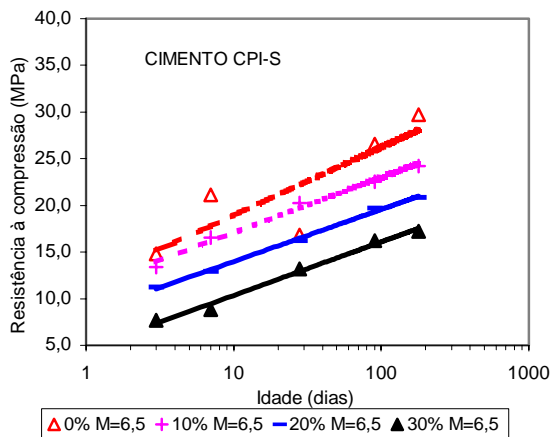


f - Cimento ARI e traço m=6,5

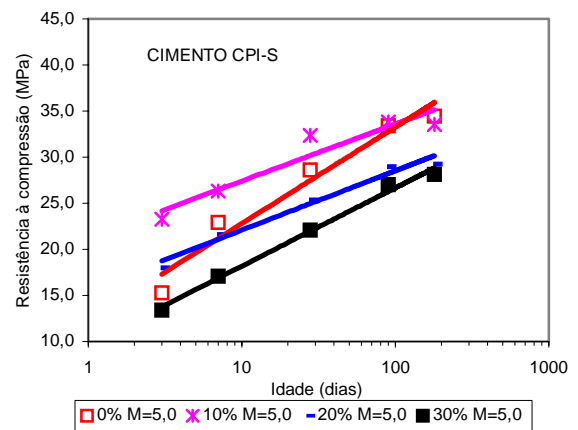
Figura 4.26 – Correlações para as resistências à compressão dos concretos Areia/CZP

Observa-se pela Figura 4.28 que as linhas representando os concretos com substituição, principalmente 10% e 25% de areia pela cinza pesada, estão na maioria das vezes acima do intervalo de confiança de 95% construído para o concreto de referência;

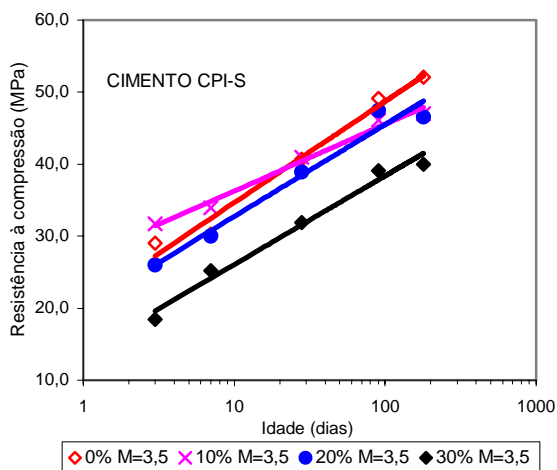
Nota-se que a inclinação das retas, tanto para os concretos de referência quanto para os concretos com substituição, segue praticamente a mesma tendência, demonstrando assim que os concretos têm comportamento semelhante quanto ao ganho de resistência em função da idade.



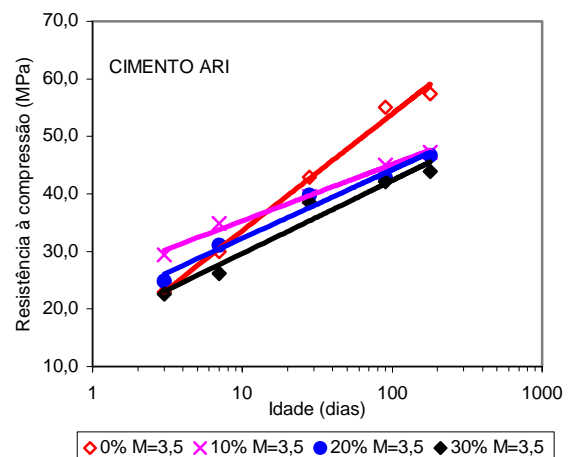
a - Cimento CPIS e traço $m=3,5$



b - Cimento CPIS e traço $m=5,0$



c - Cimento CPIS e traço $m=6,5$



d - Cimento ARI e traço $m=3,5$

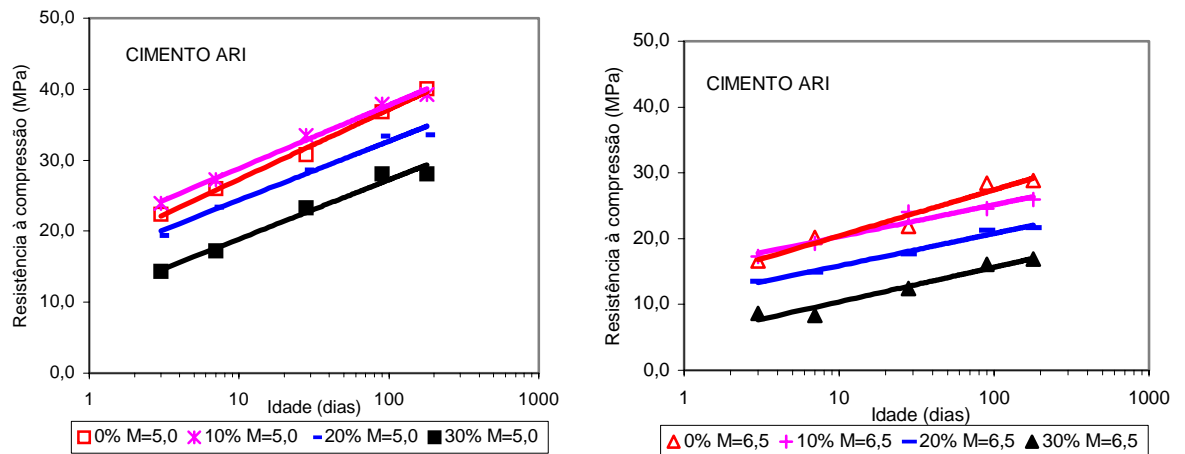
e - Cimento ARI e traço $m=5,0$ f - Cimento ARI e traço $m=6,5$

Figura 4.27 – Correlações para as resistências à compressão dos concretos CIM/CZP.

Pelas figuras 4.26 e 4.27, observa-se que o desenvolvimento de resistência à compressão tanto para os concretos de referência como para os de substituição praticamente não se diferenciam. Entretanto, nota-se que os concretos de referência tiveram crescimento de resistência à compressão maior quanto maiores as idades (entre 28 a 180 dias), com isso não se pode afirmar, através dos ensaios de Resistência à Compressão, que os concretos confeccionados com cinza pesada tiveram ganhos de resistência devido a ação pozolânica.

4.3.5 Construção dos Diagramas de Dosagem

Para todos os tipos de concretos foram construídos diagramas de dosagem do método do IPT/EPUSP descrita por HELENE e TERZIAN (1992), também conhecida como método de dosagem dos 4 quadrantes.

A resistência utilizada para construir os diagramas de dosagens a seguir foram tiradas das curvas de regressão da resistência em relação à idade mostrado nas Figuras 4,22; 4,23; 4,24 e 4,25. Esta medida levou em conta a tendência da evolução da resistência, e não somente o valor de resistência de somente 3 ou 4 corpos de prova ensaiados na idade de 28 dias.

4.3.5.1 Diagramas de Dosagem

As Figuras 4.28 e 4.29, representam os diagramas de dosagem obtidos para os concretos confeccionados com substituição da areia pela cinza pesada AREIA/CZP.

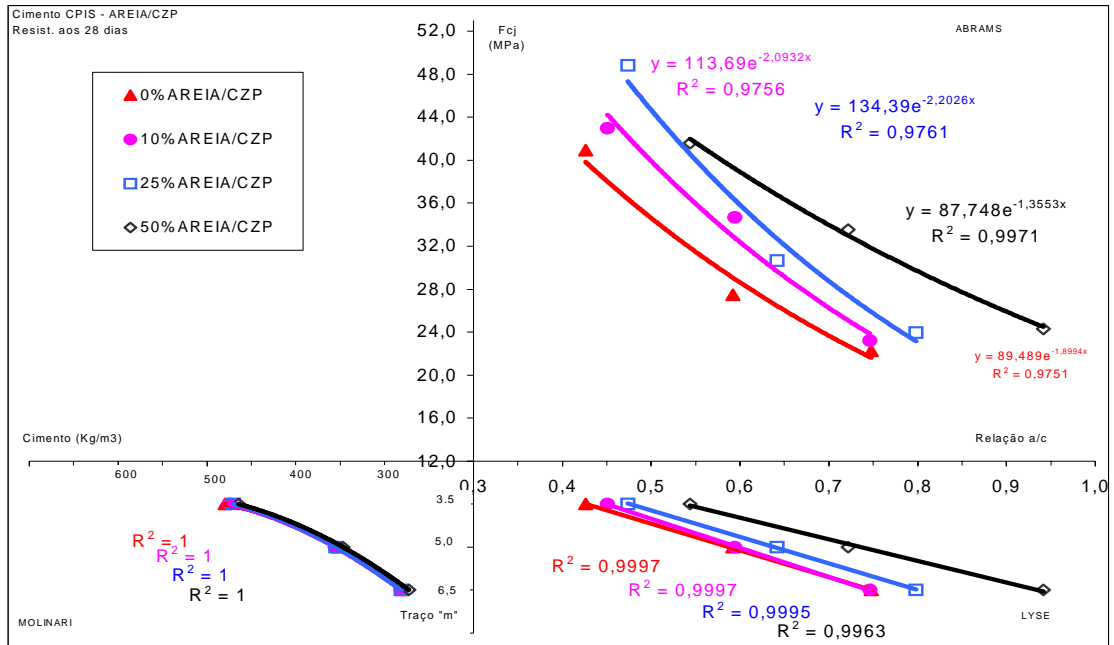


Figura 4.28 - Diagrama de dosagem para os diferentes concretos AREIA/CZP utilizando cimento CPIS.

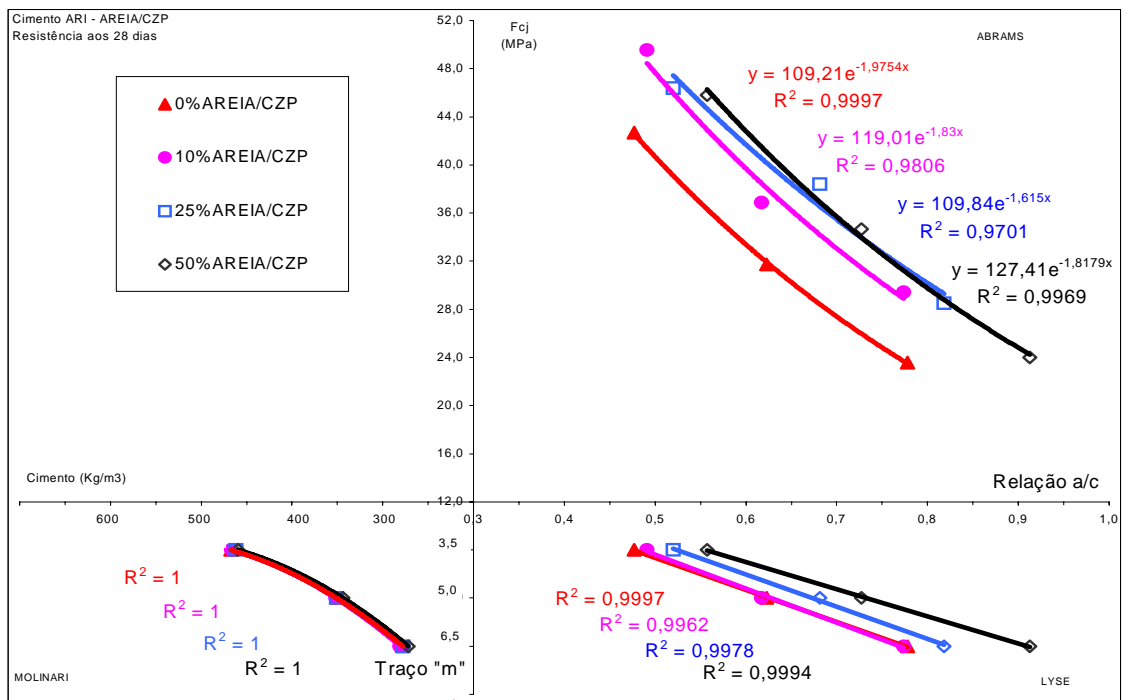


Figura 4.29 - Diagrama de dosagem para os diferentes concretos AREIA/CZP utilizando cimento ARI.

Apesar do método do IPT/EPUSP construir-se os gráficos de Abrams para diferentes idades, normalmente para 3, 7 e 28 dias, neste estudo foram plotados somente os gráficos para a idade de 28 dias, a fim de comparar-se os diferentes tipos de concretos.

Observa-se através das curvas de Abrams, plotados nas Figuras 4.28 e 4.29, que mesmo apresentando relações a/c maiores que os de referência, os concretos com substituição apresentam resistências à compressão maiores, tanto para concretos com cimento ARI ou para o CPIS.

As Figuras 4.30 e 4.31, representam os digramas de dosagem obtidos para os concretos confeccionados com substituição do cimento Portland pela cinza pesada CIM/CZP. Nos dados obtidos, procedeu-se às correlações entre a resistência à compressão, relação água/materiais cimentícios, traço em massa seca (m) e consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Nas substituições CIM/CZP, entende-se como material cimentício o cimento mais a Cinza pesada.

Ressalta-se que, nos concretos produzidos com uso da cinza pesada em substituição ao cimento Portland, a quantidade de cinza consumida é considerada na relação **água/cimento**, ou seja, **água/(cimento+cinza pesada)**.

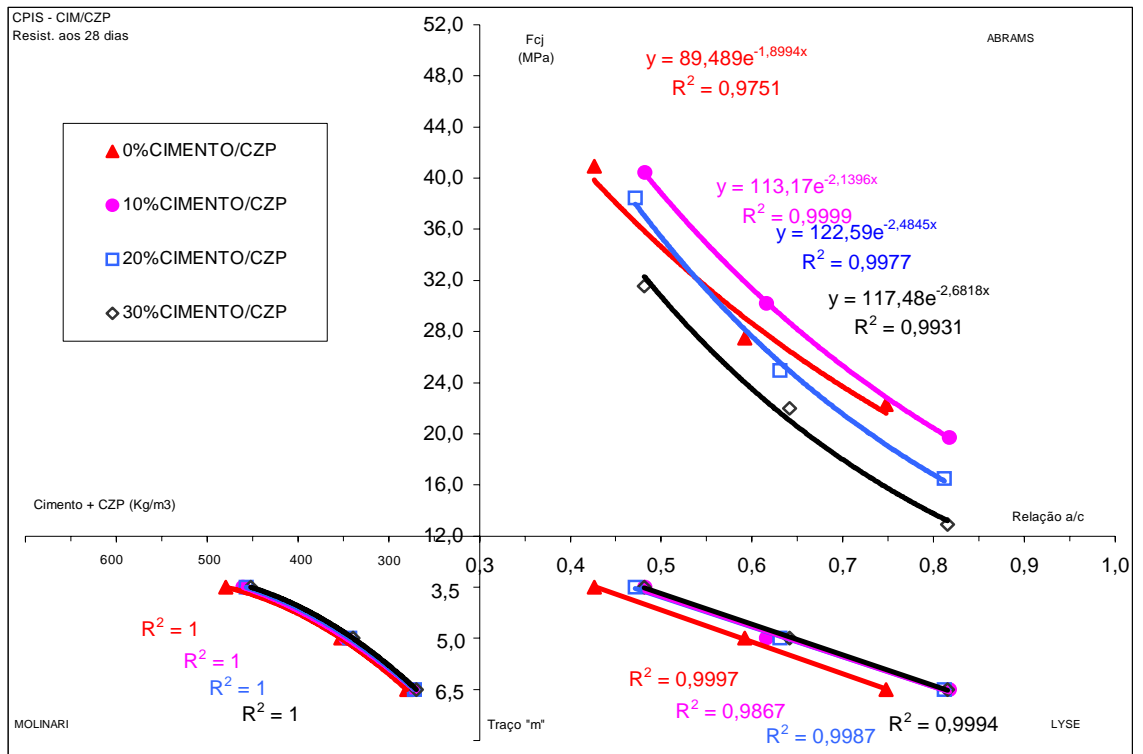


Figura 4.30 - Diagrama de dosagem para os concretos CIM/CZP utilizando cimento CPIS.

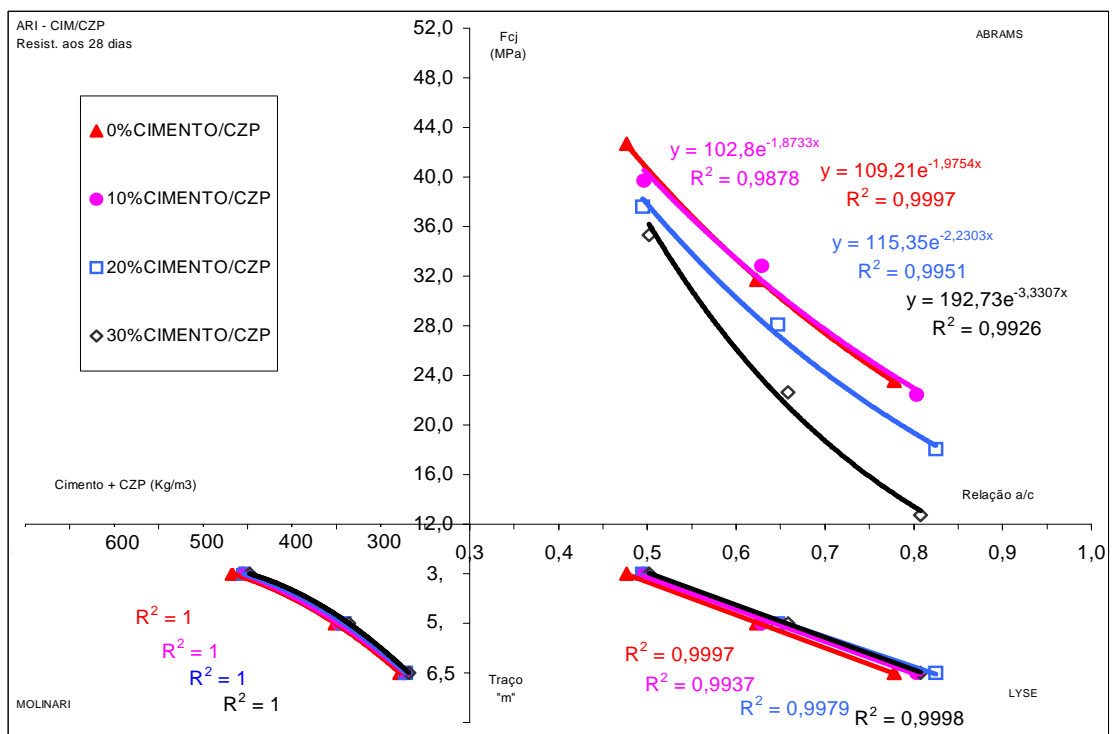


Figura 4.31 - Diagrama de dosagem para os concretos CIM/CZP com cimento ARI.

Na análise das correlações observa-se que, para todos os concretos, os coeficientes de correlação linear (método dos mínimos quadrados) foram superiores à 0,96, demonstrando com isso boa confiança nos resultados obtidos, podendo ser adotada tal metodologia para a dosagem de concretos com cinza pesada.

Através dos diagramas das Figuras 4.30 e 4.31 pode-se concluir que para a mesma relação **água/(cimento+cinza pesada)** a resistência à compressão dos concretos CIM/CZP praticamente foi a mesma entre o concreto de referência e 10% de substituição, mas com maior substituição de cimento pela cinza pesada, a resistência diminuiu gradativamente.

4.4 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Segundo a NBR 9779 (1987), imediatamente após a realização da última leitura de absorção de água por capilaridade, os concretos devem ser rompidos ao longo do corpo de prova para fazer a leitura da altura capilar no interior dos corpos de prova. Este procedimento foi realizado para algumas poucas amostras, no entanto a altura capilar não se mostrava visível e gerava dúvidas nos resultados coletados, com isso não serão apresentados estes resultados.

Para o ensaio de absorção capilar da água, os resultados são apresentados como o volume de água absorvida pela área de contato em relação à raiz quadrada do tempo. Estes gráficos estão apresentados no Anexo B.

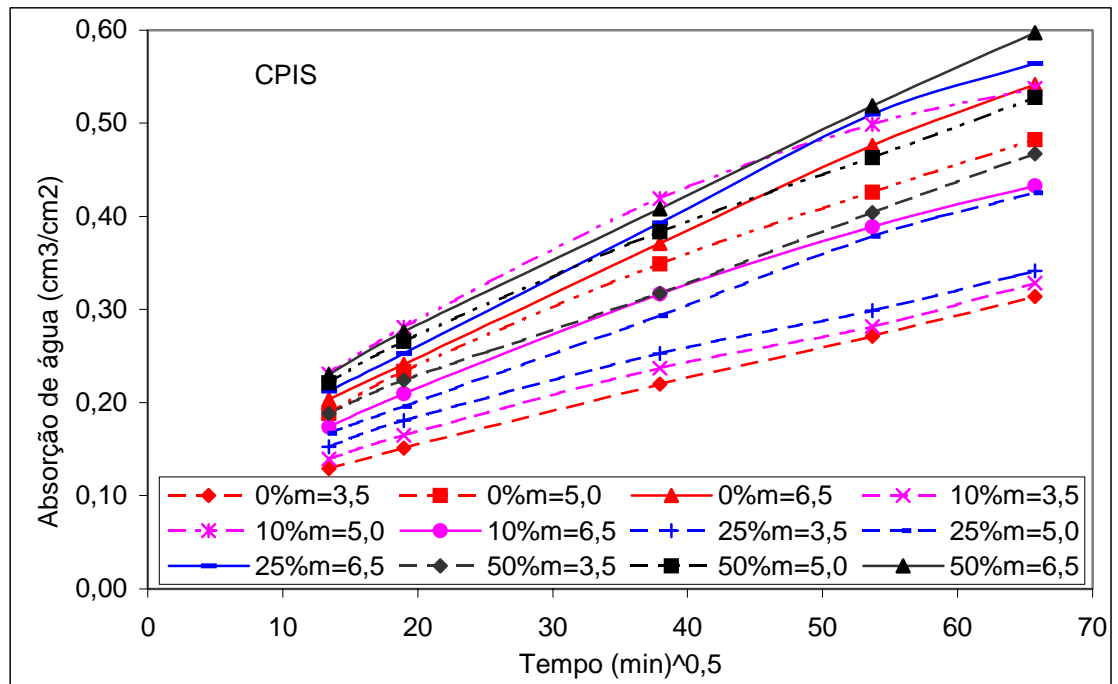


Figura 4.32 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos AREIA/CZP com cimento CPIS aos 210 dias.

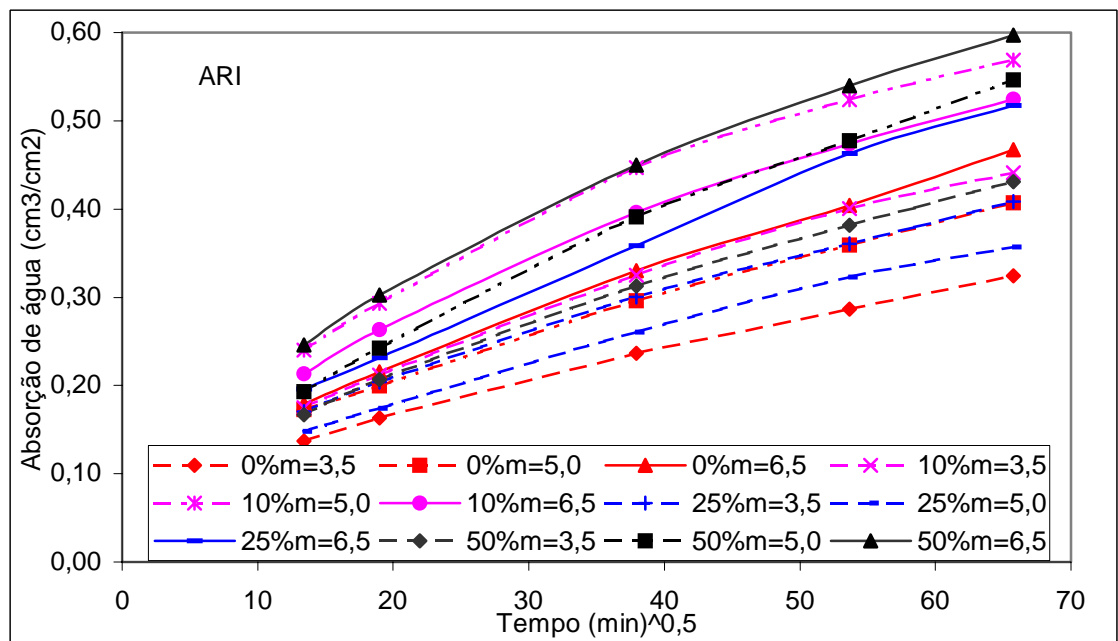


Figura 4.33 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos AREIA/CZP com cimento ARI aos 210 dias.

Percebe-se que os resultados apresentados nas figuras 4.32 e 4.33 aproximam-se bastante. Faz-se necessário salientar que os concretos com substituição de 50% da areia pela cinza pesada, no geral, apresentaram maiores absorções.

Pela análise da Figura 4.33, observa-se que todos os concretos de referência tiveram coeficiente de absorção capilar menores aos concretos utilizando cinza pesada. Também verifica-se que os concretos feitos com o cimento ARI não seguiram uma tendência de que quanto maior o teor de substituição maior a absorção, já que os concretos com 10% e 50% tiveram os piores desempenhos quando comparados aos concretos com 25% de substituição e o de referência. É interessante observar que, o concreto confeccionado com 10% de substituição e traço $m=5,0$ foi ligeiramente superior a absorção capilar em relação ao mesmo concreto, mas confeccionado com traço de 6,5.

Tabela 4.31 - Coeficiente de absorção capilar para concretos AREIA/CZP e concretos CIM/CZP

Tipo de substituição	% de substituição	Traço	Coeficiente de absorção capilar	
			CPI S	ARI
AREIA/CZP	0%	m=3,5	0,0035	0,0036
		m=5,0	0,0056	0,0045
		m=6,5	0,0065	0,0055
	10%	m=3,5	0,0035	0,0052
		m=5,0	0,0060	0,0064
		m=6,5	0,0050	0,0060
	25%	m=3,5	0,0035	0,0045
		m=5,0	0,0050	0,0041
		m=6,5	0,0069	0,0063
	50%	m=3,5	0,0053	0,0050
		m=5,0	0,0058	0,0067
		m=6,5	0,0070	0,0067
CIM/CZP	0%	m=3,5	0,0035	0,0036
		m=5,0	0,0056	0,0045
		m=6,5	0,0065	0,0055
	10%	m=3,5	0,0077	0,0056
		m=5,0	0,0067	0,0057
		m=6,5	0,0105	0,0109
	20%	m=3,5	0,0054	0,0091
		m=5,0	0,0121	0,0093
		m=6,5	0,0087	0,0113
	30%	m=3,5	0,0078	0,0089
		m=5,0	0,0071	0,0060
		m=6,5	0,0112	0,0121

Através da tabela 4.31, nota-se que os concretos CIM/CZP tiveram coeficiente de absorção capilar significativamente maiores que os concretos Areia/CZP, provavelmente devido a falta de finos para preenchimento dos vazios capilares.

Pelos dados apresentados na tabela 4.31 não se pode afirmar que o tipo de cimento interferiu na absorção capilar, pois houve algumas vezes em que os concretos com cimento ARI tiveram absorção capilar menor em relação aos concretos confeccionados com cimento CPIS e outras vezes concretos com CPIS tiveram absorções menores que os concretos ARI.

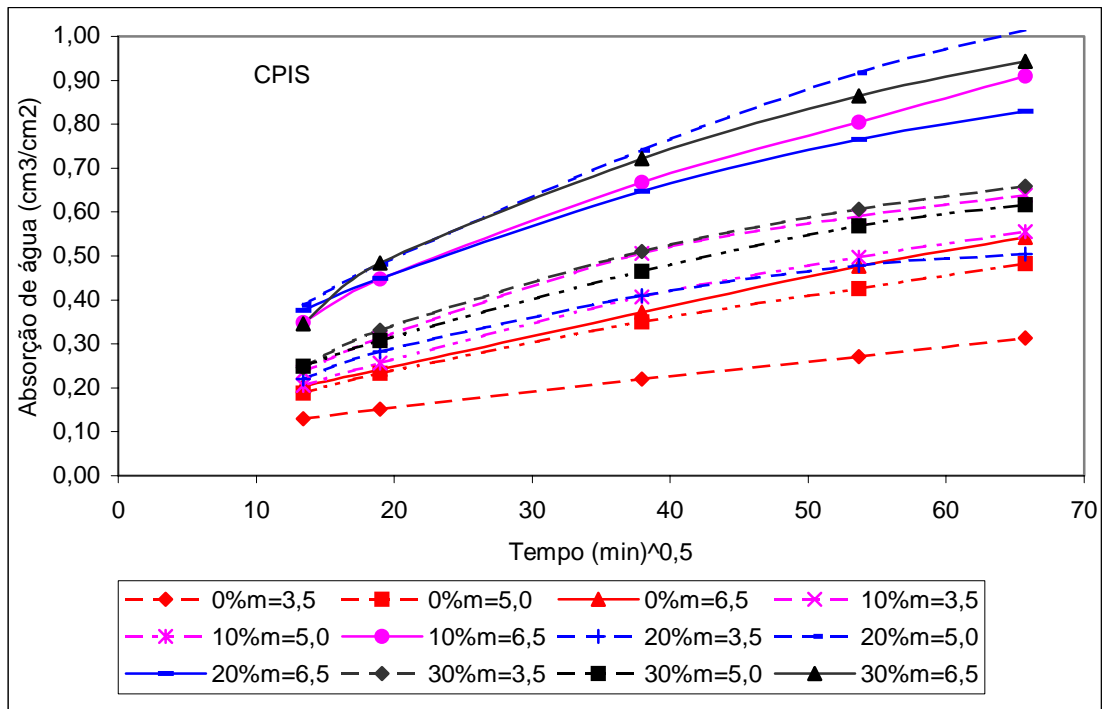


Figura 4.34 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos CIM/CZP com cimento CPIS aos 210 dias.

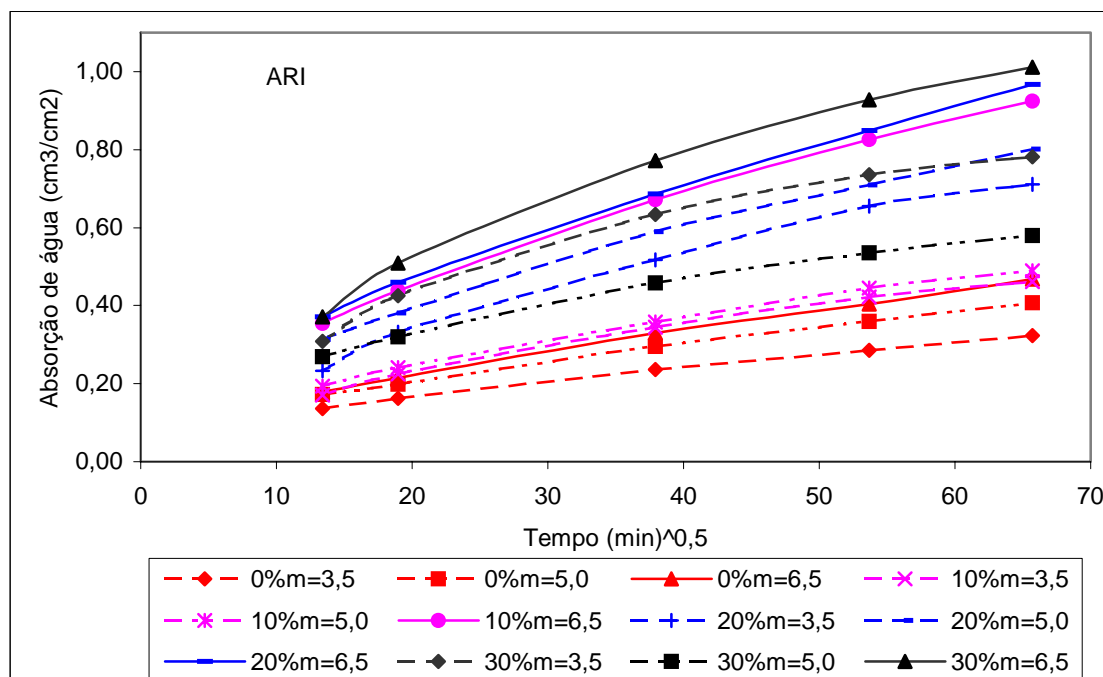


Figura 4.35 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos concretos CIM/CZP com cimento ARI aos 210 dias.

Observa-se pelas Figuras 4.34 e 4.35 que para os concretos de referência a absorção capilar foi inferior aos concretos usando cinza pesada em substituição ao cimento, tanto para os concretos moldados com cimento ARI como para o cimento CPIS.

4.5 Custos dos Insumos para a Produção de Concretos

Com a obtenção das curvas de dosagens, partiu-se para avaliar os custos de produção dos diferentes concretos e o consumo de cimento para produção de 1 m³ de concreto.

Para isso estipulou-se uma resistência média (F_{cj}) de 32 MPa a ser alcançada pelos concretos aos 28 dias de idade concretos. Esta resistência teve como finalidade fazer uma comparação dos custos dos insumos.

Esta comparação pode ser considerada válida pois custo de produção muitas vezes se torna o fator decisivo a ser considerado para a escolha do tipo de concreto.

4.5.1 Consumo de Cimento para a Produção de Concreto com Resistência Média, $f_{cj}=32$ MPa

Através dos diagramas de dosagens e das equações retiradas destes, fez-se o cálculo do consumo de cimento para a produção de concreto genérico, a fim de atingir uma

resistência média de 32 MPa aos 28 dias de idade, objetivando comparar os consumos de cimento pelos diferentes concretos confeccionados. As quantidades de cimento necessárias para a produção destes concretos apresentam-se nas Tabelas 4.32 e 4.33. Na Figura 4.36 e 4.37 estão apresentados os seus histogramas.

Tabela 4.32 – Quantidades de cimento para a produção de um concreto do tipo AREIA/CZP com resistência média de 32 MPa aos 28 dias.

Substituição (%)	Consumo de cimento (kg/m)	
	Cimento CPIS	Cimento ARI
0%	392,0	360,1
10%	356,9	304,9
25%	353,1	305,2
50%	348,5	336,3

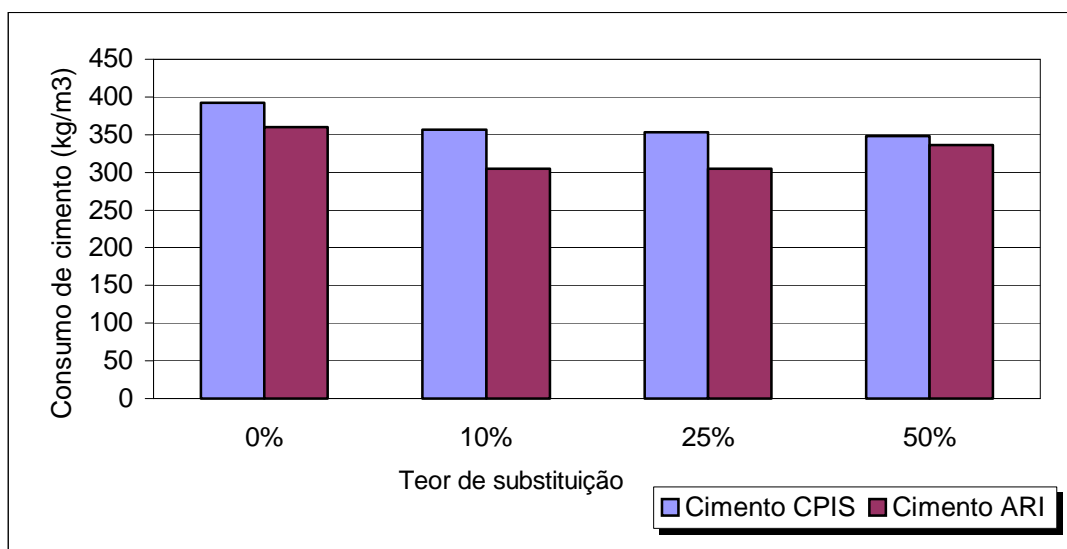


Figura 4.36 - Histogramas com o consumo de cimento para o concreto AREIA/CZP para R_c de 32 MPa.

O consumo de cimento para a produção de 1 m^3 de concreto variou de acordo com o traço utilizado, o teor de substituição, tipo de substituição e ao tipo de cimento utilizado.

Para o cálculo da relação água/cimento foi utilizada a água incorporada no momento da moldagem e a água presente na cinza pesada (umidade=44%).

As quantidades tanto de cimento quanto a quantidade de cimento+cinza pesados necessários para a produção dos concretos CIM/CZP estão apresentados na Tabela 4.33. Na Figura 4.37 estão apresentados os seus histogramas.

Tabela 4.33 – Quantidades de cimento e cimentantes para a produção de um concreto do tipo CIM/CZP com resistência média de 32 MPa aos 28 dias

Substituição (%)	Consumo (kg/m)			
	CZP+Cimento CPIS	Cimento CPIS	CZP+Cimento ARI	Cimento ARI
0%	392,0	392,0	360,1	360,1
10%	379,0	341,1	362,3	326,1
20%	415,6	332,5	394,3	315,5
30%	528,1	369,7	417,4	292,2

Nota-se pela Tabela 4.33 que há dois tipos de consumos: consumo somente do cimento e consumo do cimento+cinza pesada. Esta diferença foi considerada já que neste caso, a cinza pesada entrou como substituição de parte do cimento, e esta foi considerada como aglomerante, mas para efeito de cálculo dos custos dos insumos, como a cinza pesada tem um valor comercial muito menor do que o cimento, é importante levar em conta somente o consumo do cimento efetivo, como mostra a Figura 4.37.

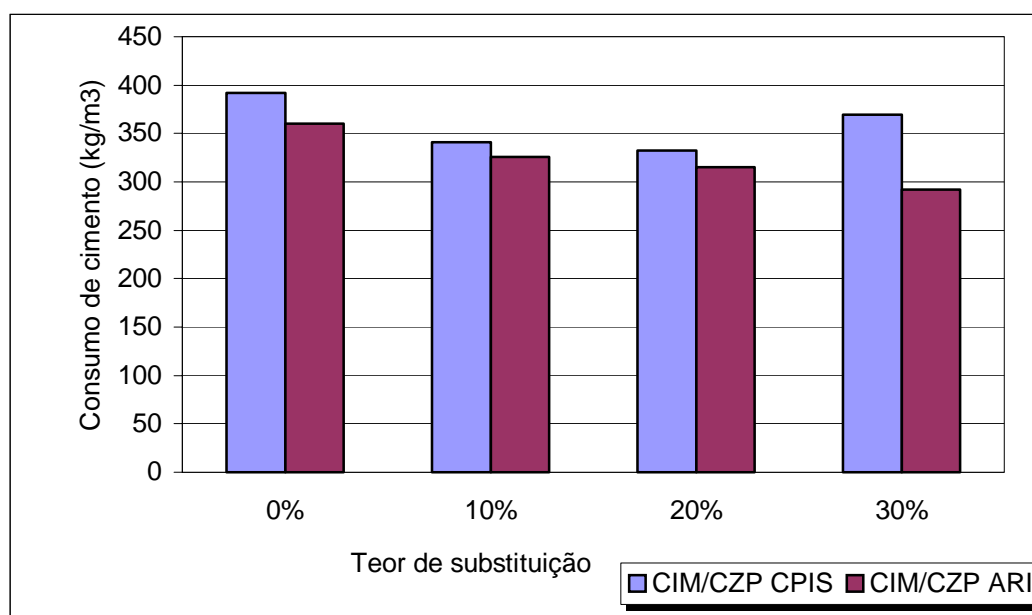


Figura 4.37 - Histogramas com o consumo de cimento para os concretos CIM/CZP

Através das Figuras 4.36 e 4.37 nota-se que os concretos com adição da cinza pesada necessitaram menores quantidades de cimento para produzirem concretos com o mesmo desempenho, quando relacionados à resistência à compressão média de 32 MPa.

4.5.2 Relação entre a Resistência à Compressão e os Custos Unitários

Para a análise dos custos dos concretos, tomou-se como base somente os custos médios unitários dos materiais, praticados no estado de Santa Catarina, no mês de junho de 2001, conforme a Tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Preço médio dos insumos.

Insumo	Areia	Brita	Cimento	Cinza pesada
Custo R\$/kg	0,0141	0,0204	0,2600	0,0031

O custo unitário estimado dos concretos produzidos com e sem cinza pesada estão apresentados nas Tabelas 4.35 e 4.36.

Tabela 4.35 - Custo para concretos com substituição da areia pela cinza pesada.

	% de subst.	Traço	R\$/m ³	fc28 (MPa)		% de subst.	Traço	R\$/m ³	fc28 (MPa)
Cimento ARI	0	m=3,5	150,8	42,7	Cimento CPIS	0	m=3,5	145,3	40,9
		m=5,0	122,3	31,7			m=5,0	115,9	27,5
		m=6,5	104,1	23,5			m=6,5	99,3	22,3
	10	m=3,5	140,0	49,4		10	m=3,5	143,0	43,0
		m=5,0	121,8	36,9			m=5,0	116,2	34,7
		m=6,5	104,1	29,4			m=6,5	98,8	23,2
	25	m=3,5	147,2	46,6		25	m=3,5	140,5	48,8
		m=5,0	120,2	38,6			m=5,0	114,3	30,6
		m=6,5	101,6	28,5			m=6,5	97,2	24,0
	50	m=3,5	144,7	45,9		50	m=3,5	136,9	41,6
		m=5,0	115,5	34,7			m=5,0	109,5	33,5
		m=6,5	97,1	24,0			m=6,5	91,8	24,3

Na Figura 4.38 são mostradas as curvas de resistência à compressão *versus* o custo do concreto dos concretos Areia/CZP.

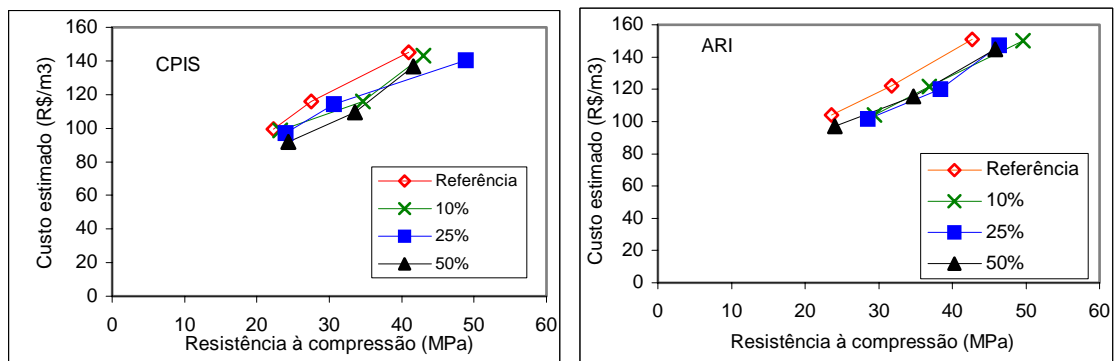


Figura 4.38 – Relação da resistência à compressão aos 28 dias os custos dos concretos AREIA/CZP.

Tabela 4.36 – Custo para concretos com substituição do cimento pela cinza pesada.

	% subst.	Traço	R\$/m³	fc28 (MPa)		% subst.	Traço	R\$/m³	fc28 (MPa)								
	Cimento ARI					Cimento CPIS											
0											m=3,5	150,8	42,7	0	m=3,5	145,31	40,9
											m=5,0	122,3	31,7		m=5,0	115,86	27,5
											m=6,5	104,1	23,6		m=6,5	99,27	22,3
10											m=3,5	135,0	49,6	10	m=3,5	128,09	40,4
											m=5,0	111,8	36,9		m=5,0	105,22	30,2
											m=6,5	94,7	29,4		m=6,5	89,44	19,7
20											m=3,5	123,0	46,4	20	m=3,5	116,55	38,5
											m=5,0	101,0	38,4		m=5,0	96,12	25,0
											m=6,5	87,5	28,5		m=6,5	83,10	16,5
30											m=3,5	109,7	45,8	30	m=3,5	104,57	31,6
											m=5,0	90,9	34,7		m=5,0	87,07	22,0
	m=6,5	79,5	24,0	m=6,5	76,07	12,9											

Na Figura 4.39 são mostradas as curvas de resistência à compressão *versus* o custo do concreto CIM/CZP.

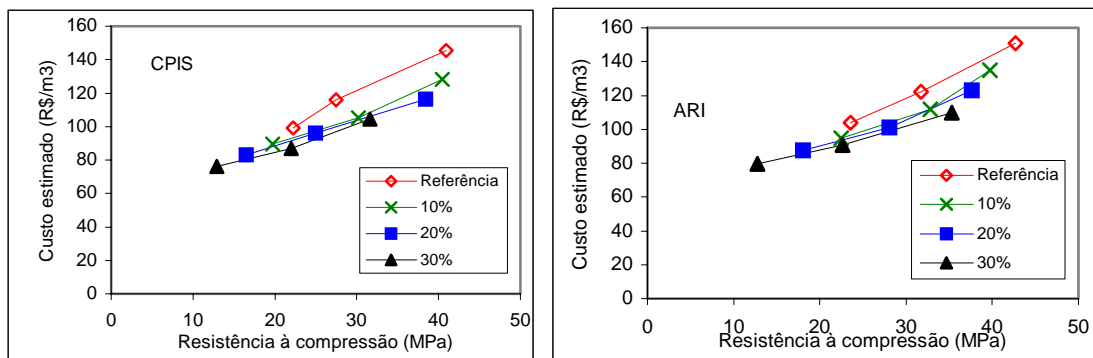


Figura 4.39 - Relação da resistência à compressão aos 28 dias versus os custos dos concretos CIM/CZP.

Fazendo uma comparação dos concretos aos 28 dias, observa-se nitidamente pelas Figuras 4.38 e 4.39 que o custo de produção dos concretos é menor quando utilizada a cinza pesada, isso considerando toda a faixa abrangida pelo estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com a realização do presente estudo, foi possível analisar algumas variáveis que interferem no desempenho dos concretos produzidos com cinza pesada de termelétrica. Através destas análises, foi possível fazer algumas considerações sobre o efeito da substituição tanto da areia por cinza pesada como também do cimento pela cinza pesada.

Pelos resultados da análise das diferentes curvas granulométricas, observa-se que a cinza pesada pode servir como um material alternativo para compor diferentes granulometrias, suprimindo uma eventual falta de material fino em composições granulométricas de agregados.

Verificou-se um aumento no teor de água dos concretos com cinza pesada quanto maior o teor de substituição, tanto para as substituições de areia pela cinza pesada como a substituição do cimento pela cinza pesada.

Com relação à perda de abatimento, os concretos confeccionados com cinza pesada tiveram menores perdas de abatimento quanto maior o teor de substituição.

Na substituição da areia por cinza pesada em relação ao volume absoluto, obteve-se concretos com menores massas específicas em relação aos de referência. Para os concretos com substituição do cimento as massas específicas também ficaram abaixo dos de referência devido à baixa massa específica apresentada pela cinza pesada em relação ao cimento.

Mesmo com o aumento no consumo de água nos concretos com cinza pesada, este não foi decisivo para a diminuição da resistência à compressão destes concretos, já que as partículas de cinza pesada absorvem grande quantidade de água,

O emprego da cinza pesada na confecção dos concretos areia/CZP não influenciou decisivamente na coloração desses concretos, apesar da cinza pesada utilizada no estudo ser mais escura do que a areia. Nos concretos com substituição do cimento pela cinza

pesada, devido à semelhança das cores entre a cinza pesada e o cimento - a qual estava a substituir-, não houve qualquer interferência na coloração final.

Através dos gráficos dos custos de produção dos concretos com a sua resistência, conclui-se que se produz concreto mais econômico utilizando-se a cinza pesada na sua produção, tanto para substituição de parte da areia como para parte do cimento.

Independente do tipo de concreto, de alta ou baixa resistência à compressão, as adições de cinza pesada no lugar da areia se comportaram de maneira semelhante, ou seja, não houve um decréscimo na resistência à compressão dos concretos de alta resistência devido à adição de cinza pesada, comparando-se com o concreto de referência, isso também ocorreu para os concretos de menores resistências.

Não ficou evidente que a cinza pesada influenciou significativamente no aumento da resistência à compressão dos concretos a partir do 28º ao 180º dia, devido à ação pozolânica. No entanto, a adição da mesma influenciou positivamente para o aumento da resistência em praticamente todas as idades estudadas independente do teor de substituído.

Baseado nas similaridades das resistências à compressão dos concretos de referência e aqueles com cinza pesada na idade de 3 dias, observou-se a possibilidade de utilização da cinza pesada na produção de concretos para peças pré-moldadas nas empresas de pré-moldados, já que estas necessitam de uma desforma mais rápida, e para isso devem ter resistências à compressão alta nas primeiras idades.

Para a produção de concretos com cinza pesada, é aconselhável adicioná-la como parte da areia, pois com a utilização dos mesmos traços (cimento : agregado), pode-se produzir concretos com mesmas faixas de resistência à compressão que os concretos de referência, sem prejudicar o desempenho. Outro fator está na menor absorção de água por capilaridade apresentada pelos concretos areia/CZP em relação aos concretos cimento/CZP. No entanto ainda são necessários estudos mais aprofundados sobre a influência de outros fatores na substituição da areia pela cinza pesada como, por exemplo, a retração do concreto.

Quanto à durabilidade dos concretos, não se pode tirar muitas conclusões, no entanto pelo que se observou na absorção capilar, os concretos com Cinza Pesada tiveram

maiores absorção capilar, indiretamente caracterizando concretos mais suscetíveis ao ambiente externo. O que foi de certa forma uma surpresa, já que inicialmente pensou-se que com a presença de mais finos no concreto, estes preencheriam os poros do concreto, no entanto o efeito aconteceu de maneira inversa.

No que tange a porcentagem a ser substituída, pode-se dizer que para o teor de 25% é a melhor opção, por não requerer quantidade muito grande de água, por ter absorção capilar razoável, e possuir resistências à compressão superiores aos demais.

Através do trabalho demonstrou-se que o método IPT/EPUSP foi adequado para a dosagem em concretos empregando cinza pesada, podendo este ser utilizado como ferramenta para aplicação prática;

A fim de tornar a cinza pesada um material de uso corriqueiro na produção de concretos para a construção civil, as empresas produtoras de cinza pesada devem oferecer incentivos ao uso do produto àquelas empresas que utilizarem este material, devido ao alto custo para a deposição do rejeito industrial;

Devido ao grande consumo de areia e pela limitação atual de exploração de jazidas, a descoberta de materiais alternativos para a substituição deste material é de fundamental importância. Desta forma, o trabalho veio a contribuir para demonstrar a viabilidade do emprego da cinza pesada como matéria prima para a produção de concretos.

Na Tabela 5.1 é mostrado um quadro resumo com a influência da cinza pesada na produção de concretos, levando-se em conta o concreto de referência.

Tabela 5.1 - Resumo da influência da cinza pesada nos concretos, em relação aos de referência

	TIPO DE CONCRETO	
	Areia/CZP	Cimento/CZP
Consumo de água	↑↑	↑↑
Massa específica	↓↓	↓↓
Perda de abatimento	↓↓	↓↓
Coloração	≈	≈
Coesão (aparente)	↑↑	↓↓
Resistência à compressão	↑↑	↓↓
Consumo de cimento p/ mesma resistência à compressão	↓↓	↓↓
Capilaridade (210 dias)	↑↑	↑↑
Custos de produção	↓↓	↓↓

↑↑ = maior ↓↓ = menor ≈ = semelhante

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há uma preocupação muito grande no emprego de materiais reciclados na construção civil, e isto está se tornando uma necessidade nos dias atuais, já que a produção de resíduos industriais cresce a cada dia.

Existem várias alternativas para o desenvolvimento de trabalhos futuros, dando seqüência ao presente trabalho, tais como:

- Emprego de aditivo redutor de água para a produção dos concretos com cinza pesada, obtendo as mesmas relações a/c de concretos de referência, e verificar a eficiência destes aditivos com o emprego da cinza pesada;
- Verificação da retração em concretos utilizando a cinza pesada, devido ao maior consumo de água quando se emprega este material;
- Fazer composições com diferentes granulometrias (areia mais cinza pesada) a fim de comprovar a eficiência da cinza pesada como agregado miúdo, a fim suplementar granulometrias mais grosseiras;
- Análise microestrutural dos concretos utilizando cinza pesada;
- Ensaaios de resistência à compressão em concretos contendo cinza pesada em idades mais tardias;
- Ensaiar concretos confeccionados com tempo de mistura de 10 min e com tempos de 90 min, com a finalidade de verificar se a cinza pesada libera água que ela retém após certo período de hidratação, aumentando o volume de vazios e podendo tornar o concreto menos resistente;
- Análise de concretos submetidos à cura acelerada com temperaturas acima de 40° C, a fim de verificar reações pozolânicas num menor tempo possível;

- Analisar o efeito das adições de cinza pesada na carbonatação dos concretos submetidos a cura acelerada e em ambiente com alta concentração de CO₂;
- Liberação de elementos perigosos pelas misturas;
- Produzir concretos leves usando como agregado miúdo a cinza pesada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais Pozolânicos – Especificações*, NBR 12653. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. *Agregado para concreto*, NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. *Agregado Graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro*, NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. *Agregados – Determinação da composição granulométrica*, NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Agregados – Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*, NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Agregados – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo*, NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio*, NBR 6467. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos*, NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio*, NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*, NBR 9779. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio*, NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*, NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. *Concreto Fresco – Determinação da massa específica e o teor de ar pelo método gravimétrico – Método de ensaio*, NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *Concreto – Perda de abatimento - Método de ensaio*, NBR 10342. Rio de Janeiro, 1992.

_____., *Cimento Portland e Outros Materiais em Pó, Determinação da área específica – Método de ensaio*, NBR 7224. Rio de Janeiro, 1984, 10 p.

_____., *Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm, determinação da massa específica aparente e da absorção de água – Método de ensaio*, NBR 6458. Rio de Janeiro, 1984.

_____., *Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio*, NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

_____., *Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos*, NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

_____., *Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento*, NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.

BAZUCO R. S. *Utilização de Agregados Reciclados de Concreto para Produção de Novos Concretos*. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 1999. 112p.

CHERIAF, M., PÉRA, J., ROCHA, J. C. Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash. *Cement and Concrete Research*. Vol 29 (1999). p. 1387–1391.

DAL MOLIN, D. C. C., MONTEIRO, P. J. M. Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa. In: *Proceedings of the International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*. Florianópolis, SC. 1996. p. 213-224.

DEMIRBAS. A., ASLAN A. Evaluation of Lignite Combustion Residues as Cement Additives. *Cement and Concrete Research*, Vol 29 (1999). p. 983–987.

DEMIRBAS. A., KARSHOGLU S., AYAS A. Utilization of Lignite Ash in Concrete Mixture. *Cement and Concrete Research*, Vol 25 (1995). p. 1610-1614.

DHIR R. K., MCCARTHY, TITTLE P. A. J. Use of Conditioned PFA as a Fine Aggregate Component in Concrete. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.33, Jan - Feb 2000, pp 38-42.

- EIA - Energy Information Administration. Annual Energy Review –Energy Overview – Coal. Documento eletrônico disponível na internet via www. URL: página <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/contents.html>. Última atualização em setembro de 2000.
- GAVA G. P. *Estudo Comparativo de Diferentes Metodologias para Avaliação da Atividade Pozolânica*. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 1999. 118p.
- GHAFOORI N., BUCHOLC J. Investigation of Lignite-Based Bottom Ash for Structural Concrete. *Journals of Materials in Civil Engineering*, Vol 8, Issue 3. Aug 1996, pp 128-137.
- GHAFOORI N., BUCHOLC J. Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol 94, No 2. March-April 1997, pp 90-101.
- GHAFOORI N., CAI Y. Laboratory-made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash: Part II – Long-term Durability. *ACI Material Journal*. Vol 95, Issue 3. May – June 1998, pp 244-251.
- HANEHARA S., TOMOSAWA F., KOBAYAKAWA M., HWANG K. Effects of water/powder ratio, Mixing Ratio of Fly Ash, and Curing Temperature on Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Cement Paste. *Cement and Concrete Research*. 2001. pp. 31–39.
- HELENE P. R. L., TERZIAN P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. Ed. Pini. Brasília, DF. 1992.
- KOLAY P. K., SINGH D. N. Physical, Chemical, Mineralogical, and Thermal Properties of Cenospheres From An Ash Lagoon. *Cement and Concrete Research*, Vol 31, 2001. pp. 539-542.
- KREUZ A. L., CHERIAF M., ROCHA J. C. Propriedades de Concretos Estruturais Incorporando Cinza Pesada como Parte da Areia. IV SEMINÁRIO “DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES”. *Anais*. Ibracon – Comitê Técnico 206. São Paulo. Junho 2001. pp 215-224.

- KREUZ A. L., CHERIAF M., ROCHA J. C. Estudo das propriedades dos concretos utilizando cinza pesada como parte da areia. ENTAC-2002 - IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO.
- LARRARD F., High-performance Concrete: From the Laboratory to Practical Utilization. Concrete Technology – New trends, industrial applications. RILEM *Proceedings* 26. E & FN SPON. London, (1994) p. 177-196.
- LÉA F.M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. Ed. Edward Arnold. 3ª edição, Glasgow – Grã Bretanha 1970.
- LENZI, E. J. *Influência do Uso de Cinzas da Combustão de Carvão Mineral em Argamassas de Revestimento*. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.
- MALHOTRA V. M., MEHTA P. K. *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Advances in Concrete Technology. Vol 1. Ottawa. Canada. 1996. 191 p.
- MANZ O. E. Worldwide Production of Coal Ash and Utilization in Concrete and Others Products. *Fuel*. Vol 76. 1997. pp. 691-696.
- MASLEHUDDIN M., AL-MANA A. I., SHAMIM M. Effect of Sand Replacement on the Early-Age Strength Gain and Long-Term Corrosion-Resisting Characteristics of Fly Ash Concrete. *ACI Material Journal*. Vol 86. Jan – Feb 1989, p 58-62.
- MEHTA P. K., MONTEIRO P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. Ed. PINI, 1ª edição, São Paulo, 1994.
- NEVILLE A. M. *Propriedades do Concreto*. Ed. PINI, 2ª edição. São Paulo, 1997. 828p.
- POZZOBON C. E. *Aplicações Tecnológicas para a Cinza do Carvão Mineral Produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda*. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 1999. 122p.
- RANGANATH R. V., BHATTACHARJEE B., KRISHNAMOORTHY S. Influence of Size Fraction of Pondered Ash on Its Pozzolanic Activity. *Cement and Concrete Research*, Vol 28, Nº 5. 1998. pp. 746–761.

- RAVINA D., Mechanical Properties of Concrete Incorporating a High Volume of Class F Fly Ash as Partial Fine Sand Replacement. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.31, Mars 1998, pp 84-90.
- RAVINA D., Properties of Fresh Concrete Incorporating a High Volume of Fly Ash as Partial Fine Sand Replacement. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.30, Oct 1997, pp 473-479.
- ROCHA, J. C.; CHERIAF, M; POZZOBON, C. E.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER S. M. T.; Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos técnicos e ambientais. XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, *Anais*. Foz do Iguaçu-PR, Brasil, 1999. 5p.
- RILEM Technical Committee MR4. *Water retention capacity of mortars*. Draft. *Materials and Structures*. Vol 13, jan-fev 1980.
- ROHDE G. M. Contexto Ambiental das Cinzas de Carvão no Brasil. II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL. *Anais*. Porto Alegre – RS. Out 1998. p. 408.
- SANCHÉZ J. C. D., ZWONOK O., FERNANDES I. D., TEIXEIRA E. C. Caracterização de Cinzas de Carvão e sua Classificação Segundo NBR 10.004. II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL. PORTO ALEGRE. *Anais*. – RS. Out 1998. p. 458-465.
- SILVA N. I. W. J. R., CHIES F., ZWONOK O. Uso de Cinzas de Carvão na Construção Civil. I ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, *Anais*. Canela - RS, 1997. p. 15-20.
- TAYLOR P. C., KRUGER R. A. Effects of Fly Ash Particle Size on Concrete Properties. INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM. *Anais*. Lexington. Kentucky, 1997. p. 350-360.
- TESSARI M. A., CONSOLI N. C. Análise da contaminação Ambiental de Camadas de Cinza Pesada de Carvão Tratada com Cimento sob Fundações Superficiais. II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL –

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL.
Anais. Porto Alegre – RS. Out 1998. p. 105-111.

XU A., SARKAR S. L., NILSSON O. Effect of Fly Ash on the Microstructure of Cement Mortar. *Materials and Structures*, Vol. 26, Oct 1993, pp 414-424.

ANEXO A

Valores de resistência à compressão, em MPa, de todos os corpos de prova ensaiados.

Concretos Referência - CPIS	Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
3,5	30,6	28,9	37,6	51,2	50,1
	29,3	31,6	43,0	47,2	53,9
	27,1	31,9	38,6	48,8	52,3
	-	28,6	43,5	-	-
5,0	14,7	21,2	29,2	34,2	34,0
	16,6	23,6	29,2	33,8	36,5
	16,3	24,0	28,6	32,2	32,8
	13,4	-	27,6	-	-
6,5	14,7	20,9	15,8	25,6	30,6
	14,5	21,1	17,6	26,6	28,1
	16,3	21,4	17,3	27,6	30,4
	15,2	-	16,7	-	-

Concretos Referência - ARI	Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
3,5	21,1	32,2	40,2	56,3	58,2
	12,3	29,6	42,3	53,0	56,9
	32,9	28,2	45,9	56,0	57,1
	25,5	-	43,0	-	-
5,0	19,3	26,0	33,3	35,3	39,9
	24,8	24,3	30,1	38,3	40,3
	24,9	27,7	30,3	34,9	40,0
	20,5	-	29,4	38,8	-
6,5	17,5	19,5	21,8	27,6	27,7
	17,3	20,5	21,9	29,0	29,7
	15,3	21,6	22,0	28,8	29,0
	16,5	19,1	-	-	-

Concretos 10% AREIA/CZP - CPIS	Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
3,5	35,4	29,5	43,9	53,5	50,5
	34,7	34,8	46,6	51,4	46,4
	35,0	32,8	43,3	49,5	54,1
	-	28,0	39,2	53,6	-
5,0	24,0	31,2	32,8	42,4	34,6
	25,7	31,1	34,8	40,1	41,1
	27,0	29,0	37,4	40,7	42,4
	23,5	29,9	36,2	-	-
6,5	17,1	13,6	24,8	31,3	30,6
	16,6	18,4	24,6	27,2	28,6
	14,5	14,1	23,7	26,9	30,2
	13,4	16,5	-	-	-

Concretos 10% AREIA/CZP - ARI		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	33,6	41,7	50,6	60,9	62,8	
	34,2	39,9	50,9	55,0	63,2	
	35,3	28,9	49,8	60,0	63,1	
	-	37,5	-	-	-	
5,0	24,6	32,7	36,8	44,3	47,5	
	27,5	30,8	37,4	35,8	48,0	
	26,3	33,5	36,2	40,7	45,6	
	-	-	-	36,5	-	
6,5	21,9	21,5	31,3	33,8	37,4	
	20,4	22,0	29,5	30,6	38,1	
	21,8	23,8	30,5	33,9	36,9	
	-	-	-	-	-	

Concretos 25% AREIA/CZP - CPIS		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	32,8	37,8	52,5	57,2	65,1	
	30,3	42,7	53,9	46,3	58,4	
	33,5	41,2	49,9	55,0	59,2	
	35,1	43,5	53,6	-	-	
5,0	17,3	22,6	27,5	37,4	43,3	
	18,9	23,7	27,6	38,9	39,5	
	19,4	25,2	28,2	38,1	41,0	
	18,0	-	29,6	-	-	
6,5	14,8	17,5	23,6	29,8	34,1	
	12,9	17,4	25,1	29,1	32,7	
	14,3	17,5	24,3	29,2	29,8	
	-	-	23,2	-	-	

Concretos 25% AREIA/CZP - ARI		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	36,3	42,9	50,6	52,9	60,2	
	34,0	38,5	41,4	52,0	60,9	
	30,4	43,0	46,1	48,1	57,7	
	35,8	29,0	43,6	-	-	
5,0	25,7	33,8	39,5	45,5	42,9	
	25,1	31,3	38,2	48,4	49,9	
	25,5	22,9	36,1	47,3	52,6	
	-	29,6	38,4	-	-	
6,5	19,6	20,1	26,6	35,3	38,0	
	19,6	20,9	31,1	34,7	37,1	
	18,6	22,4	25,9	33,3	39,9	
	-	-	29,1	28,8	-	

Concretos 50% AREIA/CZP - CPIS		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	29,1	35,1	46,2	53,8	56,3	
	31,2	34,0	41,8	43,2	40,0	
	32,0	31,4	45,2	38,9	48,4	
	31,1	31,2	43,7	40,6	-	
5,0	22,8	26,8	36,3	31,3	43,3	
	21,7	22,5	36,1	40,6	37,4	
	22,5	27,4	37,2	38,6	40,4	
	-	26,4	-	36,3	-	
6,5	13,6	18,0	25,0	26,2	32,1	
	14,5	17,4	25,9	28,6	29,5	
	14,6	16,6	26,8	30,5	31,1	
	-	16,7	25,1	24,6	-	

Concretos 50% AREIA/CZP - ARI		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	31,8	39,6	42,5	59,2	62,8	
	27,2	37,6	40,9	50,1	59,7	
	28,3	35,8	42,0	50,6	59,3	
	34,4	38,3	45,5	-	-	
5,0	22,4	26,5	36,1	43,2	47,4	
	23,1	26,1	35,9	42,3	44,5	
	24,5	25,6	33,4	40,6	45,9	
	-	-	30,4	37,2	-	
6,5	14,7	18,8	22,8	30,0	33,7	
	15,4	14,5	24,8	30,7	30,8	
	11,6	16,3	26,0	29,0	32,5	
	15,5	18,0	22,1	-	-	

Concretos 10% CIM/CZP - CPIS		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	31,0	33,1	42,0	46,3	44,1	
	32,2	34,4	39,2	45,8	45,4	
	32,0	34,9	40,9	46,2	51,6	
	-	33,3	41,7	-	-	
5,0	23,6	26,0	32,1	37,9	28,5	
	23,0	26,1	32,6	31,3	34,2	
	23,1	26,7	32,3	36,0	36,4	
	-	-	-	30,2	35,2	
6,5	13,7	16,5	20,8	22,1	25,0	
	12,8	16,6	19,8	23,5	22,8	
	14,1	16,7	19,4	22,1	24,9	
	13,1	-	21,0	-	-	

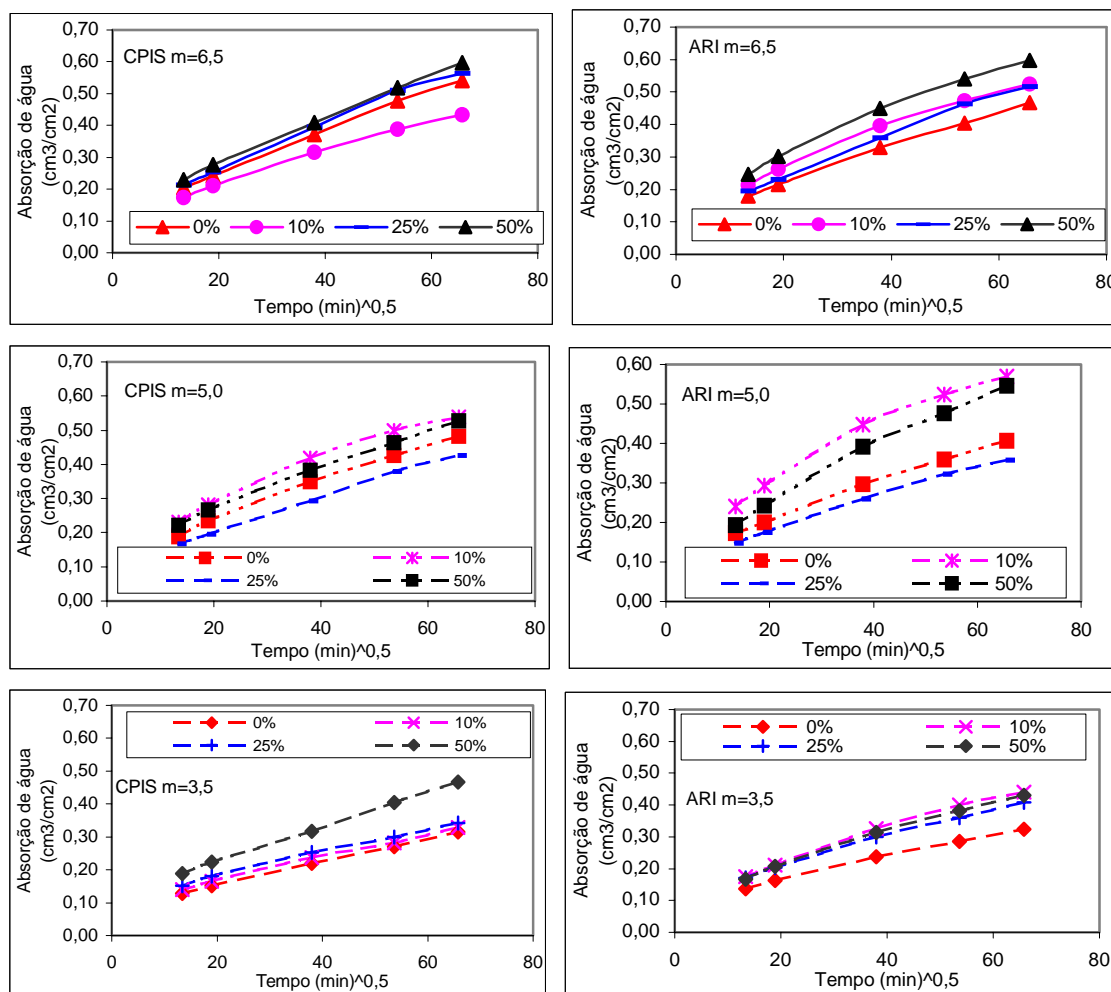
Concretos 10% CIM/CZP - ARI		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	28,4	34,8	39,5	45,3	47,1	
	28,7	34,6	39,5	45,4	47,6	
	30,0	35,1	39,7	44,4	47,0	
	30,5	-	-	-	-	
5,0	24,1	27,5	33,6	39,2	40,2	
	23,8	27,2	33,1	38,0	38,3	
	23,9	27,1	34,1	36,5	39,3	
	-	-	33,1	-	-	
6,5	17,3	20,5	24,9	24,6	26,3	
	16,8	19,1	23,2	24,2	25,7	
	17,8	17,5	24,3	24,9	25,7	
	-	20,0	23,6	-	-	

Concretos 20% CIM/CZP - CPIS		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	26,2	29,9	38,3	47,7	43,1	
	25,9	33,3	38,8	48,1	50,2	
	25,8	28,0	39,8	46,5	46,4	
	-	29,0	-	-	-	
5,0	17,9	21,5	24,7	28,4	29,0	
	17,6	22,1	25,7	29,8	30,0	
	18,6	21,2	25,7	28,6	28,6	
	17,9	-	-	-	-	
6,5	11,3	13,3	16,1	18,8	19,9	
	11,5	12,5	16,4	19,1	21,6	
	11,0	13,1	16,2	20,7	21,0	
	-	-	-	20,2	-	

Concretos 20% CIM/CZP - ARI		Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	
3,5	24,1	30,8	40,0	41,9	46,7	
	24,6	29,5	39,9	43,7	48,2	
	25,7	32,2	39,4	42,8	45,1	
	-	31,7	-	-	-	
5,0	19,1	23,5	28,9	32,4	33,7	
	19,7	23,7	28,3	34,5	33,8	
	19,5	22,9	28,5	34,6	33,2	
	-	-	-	32,0	-	
6,5	13,7	14,9	17,4	20,9	19,6	
	13,2	14,8	18,2	21,7	23,1	
	13,6	14,8	17,6	21,2	22,4	
	-	-	17,7	-	-	

Concretos 30% CIM/CZP - CPIS	Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
3,5	14,9	23,1	31,7	39,2	39,7
	19,5	26,7	32,4	39,9	41,4
	18,2	27,4	31,7	38,3	39,0
	21,2	23,6	-	-	-
5,0	13,5	16,8	22,1	26,5	27,7
	12,5	17,3	22,6	27,6	28,7
	13,7	17,1	21,7	26,9	28,0
	13,9	-	-	-	-
6,5	7,7	7,7	13,7	16,0	16,8
	7,3	9,2	13,0	16,6	17,5
	8,2	10,2	13,0	16,0	17,2
	7,5	8,2	-	-	-

Concretos 30% CIM/CZP - ARI	Resistência (MPa)				
Traço m	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
3,5	20,8	26,3	39,5	42,7	45,7
	24,6	28,1	37,9	40,2	45,0
	23,8	26,5	38,3	43,4	40,9
	21,4	23,9	-	-	-
5,0	14,2	17,4	22,8	28,6	27,0
	14,8	17,6	22,5	27,8	28,3
	14,1	16,7	23,8	27,8	29,0
	-	17,3	23,9	-	-
6,5	8,9	8,5	12,9	16,5	17,0
	8,6	8,8	11,9	15,9	17,1
	8,6	8,4	12,2	16,0	16,6
	-	7,6	12,6	-	-

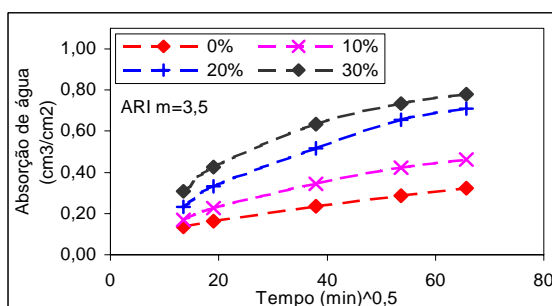
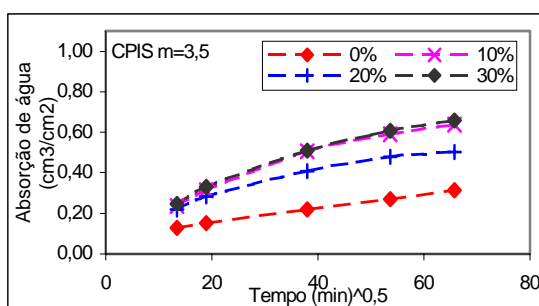
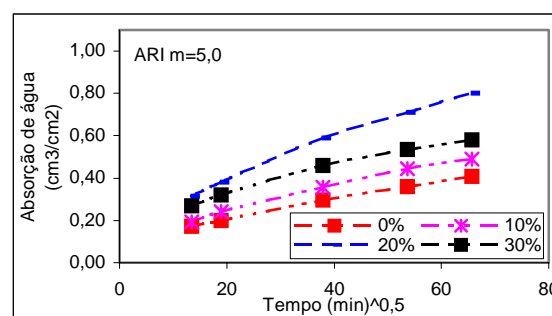
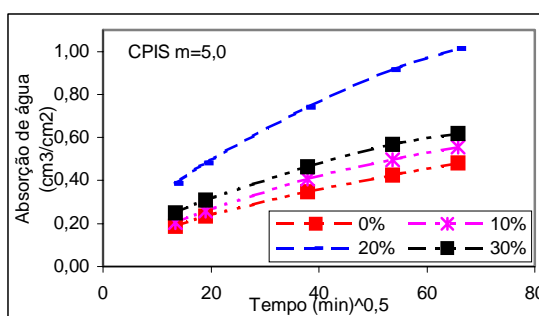
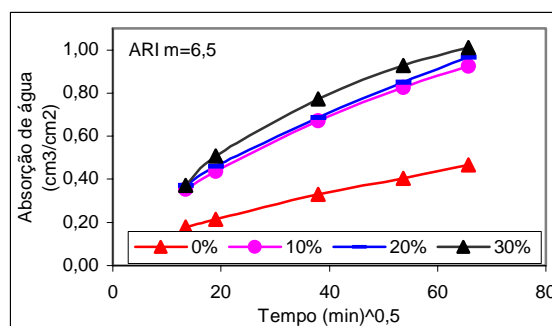
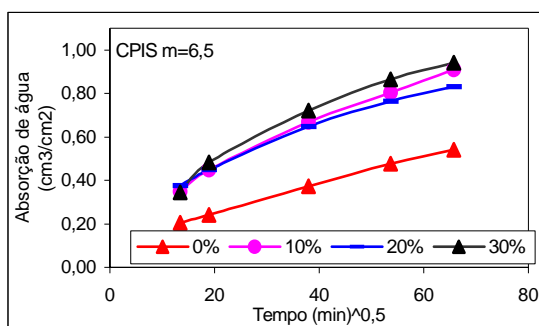


Absorção de água por capilaridade dos concretos areia/CZP aos 210 dias. a) Cimento CPIS e $m=6,5$ b) Cimento ARI e $m=6,5$ c) Cimento CPIS e $m=5,0$ d) Cimento ARI e $m=5,0$ e) Cimento CPIS e $m=3,5$ f) Cimento ARI e $m=3,5$

Absorção de água capilar média, dos concretos AREIA/CZP, ensaiados aos 210 dias de idade.

		Tempo decorrido (min)	180	360	1440	2880	4320
Cimento CPIS	0%	$m=3,5$	0,129	0,151	0,220	0,271	0,314
		$m=5,0$	0,188	0,234	0,349	0,426	0,483
		$m=6,5$	0,204	0,241	0,371	0,476	0,542
	10%	$m=3,5$	0,139	0,165	0,237	0,282	0,328
		$m=5,0$	0,231	0,281	0,419	0,499	0,538
		$m=6,5$	0,174	0,210	0,317	0,389	0,433
	25%	$m=3,5$	0,152	0,181	0,253	0,299	0,342
		$m=5,0$	0,167	0,196	0,293	0,379	0,426
		$m=6,5$	0,213	0,253	0,393	0,510	0,564
	50%	$m=3,5$	0,188	0,224	0,318	0,404	0,467
		$m=5,0$	0,222	0,266	0,383	0,463	0,528
		$m=6,5$	0,230	0,276	0,408	0,519	0,597

Cimento ARI	0%	m=3,5	0,137	0,163	0,237	0,286	0,324
		m=5,0	0,172	0,199	0,296	0,359	0,407
		m=6,5	0,180	0,215	0,330	0,404	0,467
	10%	m=3,5	0,175	0,212	0,325	0,400	0,441
		m=5,0	0,240	0,293	0,447	0,524	0,569
		m=6,5	0,213	0,263	0,396	0,474	0,525
	25%	m=3,5	0,170	0,204	0,300	0,360	0,409
		m=5,0	0,148	0,174	0,260	0,323	0,357
		m=6,5	0,196	0,231	0,358	0,463	0,517
	50%	m=3,5	0,167	0,207	0,313	0,382	0,431
		m=5,0	0,193	0,242	0,391	0,477	0,546
		m=6,5	0,246	0,302	0,450	0,540	0,597



(((Absorção de água por capilaridade dos concretos cimento/(CZP aos 210 dias a)
 Cimento CPIS e m=6,5 b) Cimento ARI e m=6,5 c) Cimento CPIS e m=5,0 d) Cimento
 ARI e m=5,0 e) Cimento CPIS e m=3,5 f) Cimento ARI e m=3,5

Absorção de água capilar média, dos concretos Cimento/CZP, ensaiados aos 210 dias de idade.

Tempo decorrido (min)		180	360	1440	2880	4320	
Cimento CPIS	0%	m=3,5	0,129	0,151	0,220	0,271	0,314
		m=5,0	0,188	0,234	0,349	0,426	0,483
		m=6,5	0,204	0,241	0,371	0,476	0,542
	10%	m=3,5	0,236	0,314	0,505	0,590	0,638
		m=5,0	0,205	0,257	0,407	0,497	0,556
		m=6,5	0,349	0,448	0,668	0,805	0,909
	20%	m=3,5	0,221	0,283	0,410	0,479	0,504
		m=5,0	0,387	0,481	0,740	0,917	1,015
		m=6,5	0,376	0,449	0,648	0,765	0,830
	30%	m=3,5	0,247	0,331	0,510	0,606	0,658
		m=5,0	0,249	0,308	0,465	0,568	0,617
		m=6,5	0,345	0,484	0,722	0,865	0,943
Cimento ARI	0%	m=3,5	0,137	0,163	0,237	0,286	0,324
		m=5,0	0,172	0,199	0,296	0,359	0,407
		m=6,5	0,180	0,215	0,330	0,404	0,467
	10%	m=3,5	0,170	0,225	0,345	0,422	0,462
		m=5,0	0,193	0,241	0,358	0,444	0,489
		m=6,5	0,354	0,438	0,671	0,826	0,924
	20%	m=3,5	0,233	0,332	0,517	0,655	0,711
		m=5,0	0,313	0,382	0,589	0,709	0,801
		m=6,5	0,371	0,460	0,687	0,849	0,966
	30%	m=3,5	0,309	0,425	0,634	0,736	0,781
		m=5,0	0,269	0,320	0,458	0,536	0,580
		m=6,5	0,371	0,509	0,772	0,928	1,011