

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais (PPGEM)**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA A
ARCO NA CONFECCÃO DE BLOCOS DE COCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Alexandre Silva de Vargas

Dissertação para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre (RS)

2002

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais (PPGEM)**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA A
ARCO NA CONFECCÃO DE BLOCOS DE COCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Alexandre Silva de Vargas

Engenheiro Civil

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre (RS)

2002

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Ângela Borges Masuero

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos A. M. Moraes

UNISINOS

Prof. Dr^a. Denise C. C. Dal Molin

PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Ruy A. Cremonini

PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Coordenador do PPGEM

*Dedico este trabalho à minha família e
à Maria Isabel.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Vilela, pela orientação desta dissertação e pela amizade demonstrada ao longo desses dois anos.

À Professora Ângela Masuero, pela amizade, apoio e orientação, fundamentais para a realização deste trabalho.

À GERDAU – Aços Finos Piratini, pelo apoio dado a este trabalho.

À TECMOLD, pelo apoio, em especial à Engenheira Maki Takudome.

À CIENTEC, pelos ensaios realizados, em especial à Engenheira Fernanda Vieira.

Ao Grupo de Mecânica Aplicada, em especial ao Engenheiro Carlos Alberto (PATO).

Ao setor de transportes da UFRGS, em especial Castilhos e Vani.

Ao grupo LASID, pelo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho, aos encontros de todas segundas-feiras pela manhã, sem contar os churrascos, e em especial à Doutoranda Feliciane Brehm.

Ao grupo NORIE, pelo apoio e acolhimento, bem como todas as festas tão importantes para uma maior integração, em especial à Professora Denise Dal Molin.

Aos colegas Marlova, Águida, Ludmila, Maria Tereza, Diana, Lucília, Geilma, Ana Paula, Juliana, Dóris, Ricardo, Dayana, Cristóvão, Giane, Alexandre Pitol (LAFUN), Daniela (LASID), Jorge (LAMEF), Maurício M., pela amizade, coleguismo e apoio demonstrados.

Ao grupo de futebol de todas as terças-feiras à noite, incluindo Professor Bonin, Henrique, Marcos, Paulo Sérgio, Daniel, Hilton, Diego.

À CAPES, pela bolsa de estudo.

À minha família, pelo apoio e amizade sempre presentes em todas as etapas da minha vida.

À minha namorada Maria Isabel, pelo companherismo, carinho, paciência e apoio demonstrados, principalmente no decorrer do curso, e a seus pais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E DE SÍMBOLOS	XVI
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 Objetivo geral	4
1.1.2 Objetivos específicos	4
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA	4
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	5
2 PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA	6
2.1 ALTERNATIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA	7
2.2 RECUPERAÇÃO DE METAIS PESADOS	8
3 TECNOLOGIA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	14
3.1 DESENVOLVIMENTO E USO DA TECNOLOGIA DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	14
3.2 UTILIZAÇÃO DO PAE E DE METAIS PESADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
3.2.1 Composição química do cimento Portland e sua hidratação	17
3.2.2 Calor de hidratação e tempos de pega do cimento	18
3.2.3 Propriedades mecânicas	37
3.2.4 Caracterização ambiental	45
4 FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO	51

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
5.1 MATERIAIS	57
5.1.1 Pó de aciaria elétrica (PAE)	57
5.1.1.1 Características químicas e físicas	57
5.1.1.2 Caracterização mineralógica, morfológica e ambiental do PAE	59
5.1.2 Cimento	61
5.1.3 Agregado miúdo	62
5.1.4 Agregado graúdo	63
5.1.5 Água	64
5.2 METODOLOGIA	64
5.2.1 Descrição de ensaios e processos de moldagens utilizando PAE	64
5.2.1.1 Ensaios em laboratório para pastas com diferentes adições do PAE	66
5.2.1.2 Ensaios em laboratório para blocos de concreto com diferentes teores do PAE	67
5.2.1.3 Análise estatística utilizada	70
5.2.1.4 Considerações gerais sobre a confecção dos blocos de concreto	71
5.2.1.5 Moldagens dos blocos de concreto intertravados para pavimentação utilizando diferentes teores do PAE	72
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
6.1 PASTAS MOLDADAS EM LABORATÓRIO	74
6.1.1 Determinação dos tempos de pega e calor de hidratação	74
6.1.2 Determinação do calor de hidratação	75
6.1.3 Caracterização mineralógica	76
6.1.4 Caracterização microestrutural	82
6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	87
6.2.1 Primeira etapa do programa experimental	87
6.2.1.1 Propriedades mecânicas	88
6.2.1.1.1 Ensaios de resistência à compressão	89
6.2.1.1.2 Ensaios à abrasão	96
6.2.1.2 Propriedades Físicas	98
6.2.1.2.1 Absorção após imersão	99
6.2.1.2.2 Massa específica	100
6.2.1.3 Avaliação da Durabilidade	103
6.2.1.3.1 Ataque por íons de cloretos	103
6.2.1.3.2 Ensaio de Eflorescência	106
6.2.1.4 Avaliação Ambiental	107
6.2.1.4.1 Ensaio de lixiviação	108
6.2.1.4.2 Ensaio de Solubilização	110

6.2.2 Segunda etapa do programa experimental	112
6.2.2.1 Ensaio mecânicos	112
6.2.2.1.1 Ensaio de resistência à compressão	112
6.2.2.1.2 Ensaio à abrasão	119
6.2.2.2 Propriedades físicas	123
6.2.2.2.1 Absorção após imersão	123
6.2.2.2.2 Massa específica	125
6.2.2.3 Avaliação da durabilidade	128
6.2.2.3.1 Ataque por íons de cloretos	128
6.2.2.3.2 Ensaio de Eflorescência	131
6.2.2.4 Avaliação Ambiental	132
6.2.2.4.1 Ensaio de Lixiviação	132
6.2.2.4.2 Ensaio de Solubilização	134
6.2.3 Considerações em relação aos resultados obtidos nas duas etapas de moldagens com blocos de concreto referência (0%) e confeccionados com teores de 5%, 15% e 25% do PAE.	136
7 CONCLUSÕES	137
7.1 Pó de aciaria elétrica (PAE)	137
7.2 Pastas de cimento com adições de diferentes teores do PAE	137
7.3 Blocos de concreto para pavimentação adicionados com PAE	138
7.3.1 Moldagem dos blocos	138
7.3.2 Avaliação mecânica	138
7.3.3 Durabilidade	139
7.3.4 Propriedades físicas dos blocos	140
7.3.5 Caracterização ambiental	140
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
9 REFERÊNCIAS	143

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS	ix
Figura 1 Representação esquemática do mecanismo de formação do PAE.....	6
Figura 2 Balanço típico de materiais para tratamento de pós com o processo CONTOP® (PEL et al.,1999).	10
Figura 3 Representação esquemática do processo com o uso de reatores metalúrgicos para resíduos complexos (YE et al.,1999).....	11
Figura 4 Proposta de um processo híbrido para tratamento do PAE (XIA et al., 1999).....	13
Figura 5 Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	19
Figura 6 Perfil da temperatura média em argamassas referência (0%) e com teores de 2% e 3% do PAE (AL-ZAID et al., 1997).....	22
Figura 7 (a) modelo de carga dispersa para a superfície de zinco de cálcio cobrindo o C-S-H e (b) o modelo geral, apresentando a importância de íons de cálcio e a zona de influência dos aditivos orgânicos e inorgânicos (MOLLAH et al., 1995).....	36
Figura 8 Etapas da caracterização da toxicidade de materiais ou resíduos de acordo com Normas Brasileiras (ROSA, 2001).	46
Figura 9 Distribuição granulométrica da amostra do PAE.	59
Figura 10 Difratoograma da amostra do PAE.....	60
Figura 11 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários da amostra do PAE (a) aumento de 3000 vezes, (b) aumento de 6000 vezes.....	60
Figura 12 Fluxograma dos ensaios realizados no programa experimental.	65
Figura 13 Ensaio de Lixiviação.	70
Figura 14 Calor de hidratação da pasta de cimento referência (0%) e das pastas com adição de 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento, ao longo do tempo.	76
Figura 15 Difratoograma da amostra de pasta de cimento referência, com idade de 7 dias. ...	77
Difratoograma da amostra de pasta contendo 5% de adição do PAE, com idade de 7 dias.	77
Figura 17 Difratoograma da amostra de pasta contendo 15% de adição do PAE, com idade de 7 dias.	78
Figura 18 Difratoograma da amostra de pasta contendo 25% de adição do PAE, com idade de 7 dias.	78
Figura 19 Difratoograma da amostra da pasta de cimento referência, com idade de 28 dias....	80
Figura 20 Difratoograma da amostra de pasta contendo 5% de adição do PAE, com idade de 28 dias.	80
Difratoograma da amostra de pasta contendo 15% de adição do PAE, com idade de 28 dias. ...	81
Figura 22 Difratoograma da amostra de pasta contendo 25% de adição do PAE, com idade de 28 dias.	81
Figura 23 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta sem adição do PAE, com idade de 7 dias, magnitude 1500 x. O ponto 1 indica a análise de EDS.	82

- Figura 24** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta contendo adição de 15% do PAE, idade de 7 dias, magnitude 2000 x. Os pontos 2 e 3 referem-se à análise de EDS.....83
- Figura 25** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta de cimento contendo adição de 25% do PAE, idade de 7 dias, magnitude 375 x. A análise de EDS realizada no ponto 4 está indicada pela letra x.84
- Figura 26** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários das pastas com idade de 28 dias, magnitude de 1000x, (a) referência (0%) com adições do PAE de (b) 5% (c) 15% (d) 25%. Os pontos indicados na figura representam análises por EDS.....85
- Figura 27** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários das pastas de cimento com idade de 28 dias (a) referência (0% do PAE) magnitude 2000 x (b) 5% do PAE magnitude 2000 x.....87
- Figura 28** Aspecto dos blocos de concreto com idade de 5 dias. Da esquerda para direita: 25%, 15%, 5% de adição do PAE em relação à massa de cimento e os referência (0%). 88
- Figura 29** Determinação da resistência característica à compressão, ao longo do tempo, para blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores do PAE.....92
- Figura 30** Efeito isolado dos teores de PAE na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação93
- Figura 31** Efeito isolado da idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.....94
- Figura 32** Efeito da interação entre o teor de PAE e idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.95
- Figura 33** Índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação, com distintos teores do PAE, ao longo do tempo.97
- Figura 34** Efeito isolado da idade no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação.98
- Figura 35** Efeito do acréscimo de teor do PAE nos valores da massa específica seca dos blocos de concreto.101
- Figura 36** Efeito isolado do acréscimo de teor do PAE nos valores da massa específica saturada dos blocos de concreto.103
- Figura 37** Evolução do ganho de massa para blocos de concreto, após ciclos de ataque por íons de cloretos, em um período de 180 dias.....104
- Figura 38** Efeito isolado do teor de PAE em blocos de concreto submetidos ao ensaio por ciclo de cloretos na resistência média à compressão106
- Figura 39** Aspecto dos blocos de concreto para pavimentação com idade de 7 dias, após o ensaio de eflorescência, para os blocos: (a) referência (0%); com teores de adição do PAE em relação à massa de cimento de: (b) 5% (c) 15% (d) 25%107
- Figura 40** Determinação da resistência característica à compressão, ao longo do tempo, para blocos confeccionados com distintos teores do PAE.116
- Figura 41** Efeito isolado do teor de PAE na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.....117
- Figura 42** Efeito isolado da idade, na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos confeccionados com diferentes teores de PAE.....118

- Figura 43** Efeito isolado da interação entre os teores do PAE e a idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.119
- Figura 44** Índice médio de desgaste à abrasão de blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos blocos com distintos teores do PAE ao longo do tempo.....120
- Figura 45** Efeito isolado do teor do PAE utilizado para a confecção dos blocos de concreto para pavimentação, no índice médio de desgaste à abrasão.121
- Figura 46** Efeito isolado da idade no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto com diferentes teores do PAE e dos blocos referência122
- Figura 47** Efeito da interação entre o teor do PAE e a idade dos blocos de concreto para pavimentação, no índice médio de desgaste à abrasão.123
- Figura 48** Efeito significativo do teor do PAE utilizado na absorção, após imersão em água, dos blocos de concreto para pavimentação.....125
- Figura 49** Evolução do ganho de massa para blocos de concreto com diferentes traços adotados utilizando o PAE, após ciclos de ataque por íons de cloretos, em um período de 180 dias.....128
- Figura 50** Efeito isolado dos blocos submetidos (identificado pela letra “C”) ou não (identificado pela letra “S”) aos ciclos por ataque de íons cloretos na resistência média à compressão (MPa).....130
- Figura 51** Aspecto dos blocos de concreto para pavimentação com idade de 7 dias, após o ensaio de eflorescência, para os blocos: (a) referência (0%); teores de adição do PAE em relação a massa de cimento de: (b) 5% (c) 15% (d) 25%131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estimativas do potencial de zinco na sucata de aço e sua recuperação no PAE.	11
Tabela 2 Porcentagens dos grupos categorizados em função dos resíduos produzidos, presentes no PAE.	12
Tabela 3 Tempos de início e fim de pega para os diferentes cimentos Portland utilizados no Brasil.	20
Tabela 4 Resultados dos tempos de início e fim de pega de pastas de cimento com substituição pelo PAE.	20
Tabela 5 Determinação dos tempos de pega em pastas de cimento com substituição de cimento pelo PAE em teores de 10% e 40% e adições de cal hidratada em teores de 0% a 25%.	21
Tabela 6 Resultados com o MEV em pastas com cimento (sem adição) e pastas de cimento/PAE na relação 90:10, ao longo do tempo.	23
Tabela 7 Resultados da difração de raios-x para pastas de cimento com diferentes teores do PAE, no 1° e 28° dias.	24
Tabela 8 Resultados de difração de raios-x, em pastas de cimento contendo PAE com diferentes adições de ZnO, aos 28 dias.	25
Tabela 9 Resultados de difração de raios-x, em pastas de cimento com PAE com diferentes adições de PbO, aos 28 dias.	26
Tabela 10 Composição das misturas utilizando C ₃ S, C ₃ A, Zn, sílica e água.	27
Tabela 11 Produtos de hidratação identificados por difração de raios-x nas diferentes misturas estudadas de C ₃ S, C ₃ A, Zn, sílica e água.	28
Tabela 12 Influência da percentagem de zinco sobre a hidratação do C ₃ S.	29
Tabela 13 Composição química de 4 cimentos distintos, cada um identificado com um número.	30
Tabela 14 Composição mineralógica (potencial de Bogue) de 4 cimentos distintos, cada um identificado com um número.	30
Tabela 15 Avaliação dos tempos de início das reações de hidratação (monitorando-se o calor liberado) de 4 cimentos distintos adicionados com zinco (horas).	31
Tabela 16 Composição de fases de dois cimentos Portland Comuns.	32
Tabela 17 Tempos de início de pega para pastas moldadas com cimentos tipo A e B, após adicionada a solução de zinco.	32
Tabela 18 Efeito do Cr (VI) nos tempos de início e fim de pega do cimento Portland Tipo I (ASTM C150) utilizando agulha de Vicat.	33
Tabela 19 Tempos de início e fim de pega em pastas com e sem adição de ZnO.	34
Tabela 20 Comportamento dos tempos de pega do cimento Portland comum e do cimento Portland Aluminoso quando da adição em suas matérias-primas de Cd, Pb, Cr e Zn.	34
Tabela 21 Resistência à compressão em pastas de cimento puro e pastas com distintos teores do PAE ao longo do tempo.	37

Tabela 22	Resistência à compressão em pastas de cimento puro e pastas com diferentes resíduos siderúrgicos, ao longo do tempo.	38
Tabela 23	Resistência à compressão, ao longo do tempo, para pastas de cimento com substituição de cimento (em teores de 1% e 5%) por ZnO e PbO.	39
Tabela 24	Resistência à compressão em pastas de cimento com e sem adição de ZnO, ao longo do tempo.	40
Tabela 25	Resistência à compressão, ao longo do tempo, em pastas de cimento contendo diferentes metais pesados.	40
Tabela 26	Verificação qualitativa da resistência à compressão com idade de 24 horas em pastas de cimentos Portland comum e Aluminoso, quando da adição em suas matérias-primas de metais pesados.	41
Tabela 27	Resistência à compressão para argamassas referência e resistência relativa da argamassa com adição de metal pesado em relação à resistência da argamassa referência.	43
Tabela 28	Quantidade de materiais, utilizando o PAE em substituição ao cimento, para a confecção de concretos, assim como amostra referência (0%)	44
Tabela 29	Valores de resistência à compressão para concretos curados imersos em água, contendo teores do PAE, em substituição ao cimento de 2% e 3% e os referência (0%)	44
Tabela 30	Resultados dos testes de lixiviação e de eficiência do encapsulamento do elemento Cr (VI), em pastas com diferentes aglomerantes.	49
Tabela 31	Composição química do PAE.	58
Tabela 32	Resultados do ensaio de lixiviação para amostras do PAE.	61
Tabela 33	Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado no trabalho.	62
Tabela 34	Distribuição granulométrica e características físicas do agregado miúdo.	63
Tabela 35	Distribuição granulométrica e características físicas do agregado graúdo.	63
Tabela 36	Características da vibro-prensa utilizada na confecção dos blocos de concreto para pavimentação.	72
Tabela 37	Valores obtidos no ensaio de consistência normal (%H ₂ O) para a pasta de cimento referência (0%) e pastas contendo 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento.	74
Tabela 38	Resultados do ensaio dos tempos de início e fim de pega para a pasta de cimento referência (0%) e as pastas contendo adição do PAE em teores de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento.	75
Tabela 39	Análise química elementar por EDS realizada no ponto 1 e indicado na figura 23, da pasta de cimento isenta do PAE, com idade de 7 dias.	83
Tabela 40	Análises por EDS, indicadas na figura 24 pelos pontos 2 e 3, da pasta de cimento contendo 15% de adição do PAE, idade de 7 dias.	83
Tabela 41	Análise química elementar por EDS do ponto 4 (indicado pela letra x na figura 25) da pasta de cimento contendo adição do PAE de 25%, com idade de 7 dias.	84
Tabela 42	Análise química elementar por EDS, realizada na pasta de cimento referência (0%) e nas pastas de cimento contendo adições do PAE em teores de 5%, 15% e 25%, com idade de 28 dias, e indicadas nos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 na figura 26.	86

- Tabela 43** Valores, em MPa, da resistência individual à compressão, da resistência média(f_p) e do desvio padrão (s), para blocos de concreto para pavimentação com diferentes adições do PAE, ao longo do tempo. 90
- Tabela 44** Valores da resistência característica à compressão ($f_{pk} = f_p - t * s$), desvio padrão (s), consumo de cimento/ m^3 (C) e relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto de pavimentação contendo distintos teores de PAE. 91
- Tabela 45** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do PAE adicionado e da interação das duas variáveis na resistência à compressão dos blocos de concreto. 92
- Tabela 46** Valores do índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto contendo diferentes teores do PAE, ao longo do tempo. 96
- Tabela 47** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do PAE no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto. 97
- Tabela 48** Resultados da absorção dos blocos de concreto para pavimentação, contendo adições do PAE, após imersão em água (%). 99
- Tabela 49** Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na absorção por imersão em água. 99
- Tabela 50** Resultados da determinação da massa específica seca dos blocos de concreto para pavimentação. 100
- Tabela 51** Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica seca. 100
- Tabela 52** Resultados da massa específica, após saturação em água, dos blocos de concreto para pavimentação (kg/dm^3). 102
- Tabela 53** Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica após saturação. 102
- Tabela 54** Valores de resistência à compressão individual, resistência média e desvio padrão para blocos com diferentes teores de PAE submetidos ao ensaio de ataque por íons cloretos. 105
- Tabela 55** Análise de Variância (ANOVA) do efeito de os blocos serem ou não submetidos aos ciclos de ataque por cloretos, do teor de PAE e a interação entre estas duas variáveis 105
- Tabela 56** Lixiviação dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 0%, 5%, 15 e 25%, da primeira etapa do programa experimental. 109
- Tabela 57** Solubilização dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 0%, 5%, 15 e 25%, da primeira etapa do programa experimental. 111
- Tabela 58** Evolução da resistência à compressão (f_p), para os blocos de concreto com distintas adições de PAE, assim como o desvio padrão (S), ao longo do tempo. 114
- Tabela 59** Valores da resistência característica à compressão ($f_{pk} = f_p - t * s$), desvio padrão (s), consumo de cimento/ m^3 (C) e relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto de pavimentação contendo teores de PAE. 115
- Tabela 60** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, do teor do PAE e da interação entre esses dois fatores na resistência à compressão dos blocos de concreto. 117
- Tabela 61** Valores do índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos com distintos teores do PAE, ao longo do tempo. 120

Tabela 62 Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do PAE no índice de desgaste à abrasão dos blocos de concreto.	121
Tabela 63 Resultados da absorção dos blocos de concreto de pavimentação com distintos teores do PAE e dos blocos referência (0%) após imersão em água (%).	124
Tabela 64 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação para a absorção após imersão em água.	124
Tabela 65 Resultados da determinação da massa específica seca dos blocos de concreto para pavimentação contendo distintos teores do PAE.	126
Tabela 66 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica seca.	126
Tabela 67 Resultados da massa específica, após saturação em água, dos blocos de concreto para pavimentação com distintos teores de PAE (kg/dm^3).	127
Tabela 68 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica após saturação.	127
Tabela 69 Valores de resistência à compressão individual, resistência média e desvio padrão para blocos referência (0%) e os blocos com diferentes teores de PAE submetidos ao ensaio de ataque por íons cloretos.	129
Tabela 70 Análise de Variância (ANOVA) do efeito de os blocos serem ou não submetidos aos ciclos de ataque por cloretos, do teor de PAE e a interação entre estas duas variáveis.	129
Tabela 71 Lixiviação dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 0%, 5%, 15 e 25%, da segunda etapa do programa experimental	133
Tabela 72 Solubilização dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 0%, 5%, 15 e 25%, da segunda etapa do programa experimental	135

LISTA DE SÍMBOLOS e SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimentos Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag - prata
Al – alumínio
As- arsênio
ASTM – American Society for Testing and Material
B - boro
Ba - bário
BF – basic furnace
BOF – basic oxygen furnace
Ca – cálcio
Cd – cádmio
Cl - cloro
CP II –Z/32 – cimento Portland composto com pozolana e com resistência mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa
Cr – cromo
C-S-H – silicatos de cálcio hidratado
Cu – cobre
DRX – Difração de raios-x
EAF- Elétrica Arc Furnace (Forno Elétrico a Arco)
EDS – Energy dispersive X-ray spectroscopy
EPA - Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental)
Fe - ferro
FEA - Forno Elétrico a Arco
FTIR – Espectroscopia Infravermelha da Transformada de Fourier
Hg - Mercúrio
MEV – Microscopia eletrônica por Varredura
Mn – manganês
NBR – norma brasileira
Ni - níquel
PAE – Pó de aciaria elétrica
Pb – chumbo.
RCRA - Resource Conservation and Recovery Act (Ato de Conservação e Reutilização de Recursos)
S/S – solidificação/estabilização
TCLP – Procedimento de lixiviação característico de toxicidade
TFP – Tempo de fim de pega
TIP – Tempo de início de pega
US EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
Zn – zinco

RESUMO

O Pó de Aciaria Elétrica (PAE) é um resíduo gerado em indústrias siderúrgicas que utilizam o Forno Elétrico a Arco (FEA) e a sucata como principal matéria-prima para a produção do aço. O PAE é composto por diferentes óxidos metálicos, entre eles o Zn, Cr, Pb e Cd. Devido às concentrações de Pb e Cd ultrapassarem as permitidas pela NBR 10004 (1987), no ensaio de lixiviação, o PAE é classificado como resíduo perigoso Classe I. Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência do PAE no desempenho mecânico e durabilidade de blocos de concreto para pavimentação. O programa experimental foi desenvolvido em duas etapas: a primeira, na qual foi fixada a relação água/cimento e a segunda, na qual foi fixado o índice de umidade, fator este relacionado com a capacidade de moldar os corpos-de-prova. Em ambas as etapas, o teor de adição do PAE empregado foi de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento. Também foram moldados corpos-de-prova sem adição do resíduo (0%), utilizados como referência. Como ensaios complementares, foram determinados o calor de hidratação, assim como a caracterização mineralógica e microestrutural de pastas de cimento com teores do PAE. Verificou-se que, nas duas etapas, os blocos contendo 15% de adição do PAE obtiveram melhor desempenho quanto à resistência à compressão axial. Para os ensaios de durabilidade, os blocos com o PAE mostraram-se com desempenho igual ou superior aos blocos que não o possuíam. O PAE utilizado nos blocos de concreto, bem como em pastas de cimento, retardou os tempos de início e fim de pega. O cimento também pode agir como formador de uma matriz para encapsular os metais pesados contidos no pó de aciaria. Nos ensaios de caracterização ambiental, observou-se este encapsulamento através da análise dos extratos lixiviados e solubilizados, onde as concentrações dos metais pesados, ao longo do tempo, diminuíram. Isto fez com que os blocos, contendo o resíduo em sua composição, fossem classificados neste trabalho como Classe II – não-inerte. Desta forma, a partir de um resíduo perigoso Classe I, foi possível desenvolver, através do encapsulamento na matriz cimentante, um produto Classe II.

ABSTRACT

Electric arc furnace dust (EAFD) is waste generated in industries that employ electric arc furnace (EAF) and scrap iron as their main raw material for steel production. EAFD's basic composition presents Fe oxides and also small amounts of Zn, Ca, Cr, Mg, Mn, Pb, Cd oxides, among others. In leaching tests, since Pb and Cd concentrations exceed the limits allowed by the Brazilian code NBR 10004 (1987) EAFD is considered hazardous waste - Class I. The aim of this study is to evaluate the effect that EAFD has on the mechanical and durability performance of concrete pavement blocks. The experimental program consisted of two stages, where for the first one the water/cement ratio remained unaltered. For the second stage it was the moisture index related to workability which remained unaltered. For both stages the EAFD/cement ratios tested were 5%, 15% and 25%. Control specimens with no EAFD (0%) were also tested. Additionally, cement pastes with EAFD were tested to determine their hydration heat and also their mineralogical and micro-structural characterization. In both stages the concrete blocks with 15% of EAFD presented superior axial compression strength. In the durability tests, blocks containing EAFD showed the same or a better performance than those with no EAFD (0%). EAFD employed in the concrete blocks as well as in the cement pastes delayed the setting time. Cement is also able to encapsulate the heavy metals present in EAFD. This encapsulation was observed during the environmental characterization of leaching and solubility samples, which heavy metals concentration decreased along time. This led the blocks with EAFD to be characterized as Class II (no inert). This means that from a Class I hazard waste it was possible to develop, through cement encapsulation, a Class II product.

1 INTRODUÇÃO

A sociedade mundial está cada vez mais conscientizada da importância de se resgatar e manter a qualidade de vida das pessoas, salientando, sobretudo na atualidade, a relevância da preservação do meio ambiente.

Não por acaso, crescem os estudos na área ambiental, bem como, nos últimos anos, as próprias organizações governamentais têm demonstrado preocupação com o assunto. Exemplos disso podem ser encontrados no Código Estadual do Meio Ambiente (Lei Estadual nº 11.520/2000) e nas publicações da Fundação de Economia e Estatística (FEE/RS), que reúnem diversos artigos orientado a prática do planejamento e da preservação ambiental (ELY, 1990).

Nesse sentido, as indústrias geradoras de resíduos preocupam-se em pesquisá-los no intuito de transformá-los em subprodutos. Além disso, vale lembrar que, de acordo com o parágrafo segundo do artigo 218 do Código Estadual (2000), *“Cessar a responsabilidade do gerador de resíduos somente quando estes, após utilização por terceiros, licenciado pelo órgão ambiental, sofrer transformações que o caracterizem como tais”*.

Assim, uma das mais urgentes questões ambientais é a reciclagem de resíduos perigosos provenientes das atividades industriais ou de sua transformação em um produto estabilizado, não-lixiviável, que seria seguramente disposto no meio ambiente (PISCIELLA et al.1999).

A caracterização de resíduos consiste em várias etapas e tem como objetivo principal a determinação das propriedades físico-químicas dos materiais e a avaliação da periculosidade destes. Desta forma, para que as possibilidades de reciclagem fiquem estabelecidas, é importante conhecer a composição química e as propriedades físicas do material, estabelecendo-se as características deste como matéria-prima secundária para diferentes indústrias (ROSA, 2001).

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, 1997) definiu que as características dos resíduos perigosos poderiam ser detectadas usando um método de teste padrão de um conhecimento de aplicação geral para as propriedades dos resíduos. Dentro deste critério, a agência estabeleceu a seguinte classificação:

- Inflamabilidade – caracteriza-se pelos resíduos que podem facilmente pegar fogo e sofrer combustão;

- corrosividade – caracteriza-se pelos resíduos que possuem características ácidas ou alcalinas (básica). Tais resíduos podem facilmente corroer ou dissolver carne, metais ou outros materiais;
- reatividade – caracteriza-se pelos resíduos que facilmente explodem ou sofrem violenta reação;
- toxicidade – caracteriza-se por resíduos que facilmente lixiviam concentrações químicas perigosas e tóxicas para dentro de águas quando dispostos no solo. Na ordem de prognosticar o tempo em que o resíduo facilmente lixivie elementos químicos dentro de águas no solo em níveis perigosos, a EPA (1997) designou uma procedência laboratorial para reproduzir o processo de lixiviação e outras condições que ocorrem quando os resíduos são enterrados em típicos aterros sanitários. Este procedimento laboratorial é conhecido como *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP).

Leis ambientais mais rigorosas e uma fiscalização mais eficiente, bem como problemas de estocagem, de transporte e poluição ambiental têm levado as indústrias a procurar melhorar seus processos produtivos com o propósito de reduzir a geração de resíduos. Entretanto, resíduos continuam sendo gerados em grandes quantidades. O que, por outro lado, tem estimulado a realização de muitos trabalhos de pesquisa que objetivam descobrir possibilidades de uso destes materiais, além de novas alternativas para uma disposição segura ambientalmente, como aquelas apresentadas por LOUZADA (1991), MONTGOMERY et al. (1992), PEREIRA (1994), JOHN (1996), JACOMINO et al. (2000), MOURA (2000), MACHADO (2000), WAINWRIGHT et al. (2000), MASUERO (2001), MANCIO (2001), GEYER (2001), SHA et al. (2001), FILHO (2002).

Para os resíduos considerados não perigosos, a solução mais utilizada são os aterros. Já para os resíduos perigosos, diferentes técnicas estão sendo utilizadas, dentre elas a de solidificação/estabilização (S/S).

A construção civil, por ser uma grande consumidora de recursos naturais, constitui-se em uma potencial consumidora de subprodutos e resíduos provenientes de outras indústrias, tais como a siderúrgica. Dessa forma, em muitos países, estes materiais têm sido utilizados com sucesso em substituição ao cimento, reduzindo os custos do concreto. Alguns

resíduos já são considerados subprodutos² e têm promovido uma melhoria nas propriedades do concreto, tornando-os mais valiosos (AL-ZAID et al., 1997).

De acordo com SJÖSTRÖM³, citado por JOHN (2000), a construção civil consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos do planeta.

Conforme dados fornecidos pelo SNIC (2002), no Brasil foram produzidas cerca de 38 milhões de toneladas de cimento em 2001. Assumindo que o cimento é misturado com agregados a um traço médio de 1:6 (cimento : agregados), em massa, segundo JOHN (2000), pode-se estimar um consumo anual de aproximadamente 228 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. Ainda, a este valor, o autor salienta que se faz necessário somar o volume de agregados utilizados em pavimentação e perdas.

Assim, a reciclagem ou utilização de subprodutos, além de reduzir a extração predatória de recursos naturais, minimiza a deposição de resíduos em aterros e a quantidade de emissões gasosas, como o CO₂⁴, que agridem o meio ambiente (MACHADO, 2000).

Neste sentido, o pó de aciaria elétrica, um resíduo sólido gerado na fabricação do aço, foi estudado com o objetivo de avaliar a sua utilização em blocos de concreto para pavimentação na construção civil. Tratando-se de um material fino, tem a possibilidade de proporcionar uma ação física como fíler, preenchendo os vazios no concreto e, assim, melhorar as propriedades mecânicas através de uma homogeneização da matriz.

A escolha da utilização do resíduo em blocos de concreto foi pelo fato deste artefato de concreto ser uma alternativa moderna, competente, racional, eficaz e econômica, consagrada mundialmente. Além disso, o pavimento de concreto é um aliado do meio ambiente, por diversos motivos: utiliza matérias-primas abundantes na natureza, não aumenta a temperatura do ar (não absorve o calor), é totalmente reciclável ao fim de sua vida útil, na fase de construção consome de 3 a 4 vezes menos energia, diminui a emissão de poluentes de veículos (monóxido de carbono e hidrocarbonetos) em decorrência da menor frequência de congestionamentos para reparos das pistas, menor espessura da estrutura, portanto, menor agressão ao solo e, finalmente, a produção do concreto é bem menos poluente que a da fabricação do asfalto (VIZZONI, 2002).

² Subprodutos são resíduos com valor comercial.

³ Sjöström, C. Service life of the building. In: **Applications of performace concept in building. Proceedings...CIB**: Tel Aviv, 1996 v.2, p.6-1;6-11.

⁴ Tal como ocorre no caso de emprego de escória de alto-forno como substituto do calcário na fabricação de cimentos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica do uso do pó de aciaria elétrica na fabricação de blocos de concreto intertravados para pavimentação.

1.1.2 Objetivos específicos

- avaliar os tempos de pega e o calor de hidratação de pastas de cimento com diferentes teores de adição do pó de aciaria elétrica;
- caracterizar mineralógica e estruturalmente pastas de cimento com diferentes teores de adição do pó de aciaria elétrica;
- avaliar a influência do teor de pó de aciaria elétrica no desempenho: mecânico, através de ensaios à compressão e à abrasão; das propriedades físicas, como absorção e massa específica; da durabilidade, através de ensaios de ataque por íons cloretos e eflorescência; ambiental, através de ensaios de lixiviação e solubilização.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação é composta de nove capítulos. No capítulo um, são apresentados: a introdução, objetivos, estrutura e limitações da pesquisa.

No capítulo dois, é feita uma revisão bibliográfica sobre o PAE: geração e alternativas para sua utilização, bem como a recuperação de metais pesados contidos no pó.

No capítulo três, consta a revisão bibliográfica da Tecnologia de Solidificação /Estabilização, seu desenvolvimento e uso, bem como a utilização do PAE e de metais pesados na construção civil e a influência dos mesmos no calor de hidratação, tempos de pega, propriedades mecânicas e caracterização ambiental.

No capítulo quatro, faz-se uma revisão bibliográfica da fabricação de blocos de concreto.

No capítulo cinco, é desenvolvido o programa experimental: caracterização dos materiais e metodologia.

Os resultados e a discussão dos mesmos constam no capítulo seis.

No capítulo sete, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho.

As sugestões para trabalhos futuros constam no capítulo oito.

E por fim, constam as referências utilizadas no capítulo nove.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Neste trabalho, não foi possível a otimização de um traço contendo PAE, em nível industrial, pois foram realizadas apenas duas moldagens dos blocos de concreto para pavimentação. Isto porque a confecção dos blocos utilizando o PAE teve como consequência a suspensão temporária da linha de produção da empresa de pré-moldados. Com esta interferência, uma grande quantidade de peças deixaram de ser produzidas.

Na segunda etapa do programa experimental, não se variou apenas o agregado fino, com o acréscimo do teor de PAE, pois a empresa adota a curva granulométrica da vibroprensa, ajustada conforme os agregados da região. Seguindo a metodologia da empresa, alteraram-se os agregados, com o acréscimo do teor do resíduo.

Os agregados utilizados foram os mesmos usados no dia-a-dia pela empresa, bem como o cimento Portland CP II - Z classe 32, que possuiu até 14 % de material pozzolânico e até 10% de material carbonáceo, conforme NBR 11578 (ABNT, 1991).

2 PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

O pó de aciaria elétrica, cuja denominação neste trabalho será de PAE, é um resíduo sólido da indústria siderúrgica, gerado como particulado nas emissões provenientes da fabricação do aço em fornos elétricos a arco (FEA) e composto, principalmente, de diferentes óxidos metálicos. O pó de aciaria também é gerado em aciarias a oxigênio que operam com conversores.

As usinas siderúrgicas dividem-se em integradas e semi-integradas. As integradas promovem a redução do minério de ferro, produção do aço líquido, as operações de metalurgia na panela, solidificação do aço e finalmente conformam mecanicamente produtos intermediários, obtendo os produtos finais (chapas, bobinas, fios, barras, perfilados, tubos, entre outros). As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução do minério de ferro, só possuem as etapas subseqüentes da fabricação de produtos siderúrgicos. O FEA normalmente é utilizado em usinas siderúrgicas semi-integradas e tem a fonte energética que independe das reações de refino. Pode, portanto, partir com matérias-primas sólidas, fundi-las via energia elétrica e, após a fusão da carga, executar as operações de refino. No entanto, é comum que este equipamento se destine principalmente à fusão da sucata de aço e/ou ferro-esponja (incluindo ou não gusa sólido na carga), com posterior refino oxidante e pela injeção de oxigênio através de uma lança apropriada (BRANDASCHIA,1986).

Na figura 1, está representado esquematicamente, no FEA, o mecanismo de formação do PAE, onde observa-se os eletrodos de grafite e os respectivos arcos elétricos com o banho metálico. À direita, pode-se ver a lança de oxigênio e, à esquerda, na parte superior, a saída de metais volatizados pelo sistema de exaustão.

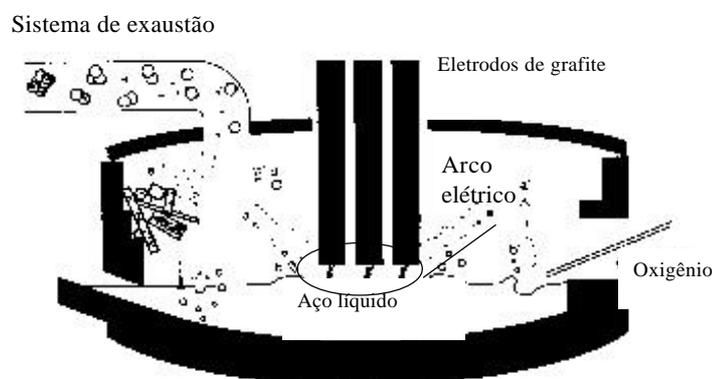


Figura 1 Representação esquemática do mecanismo de formação do PAE.

Fonte: HUBER et al. (1999).

As operações principais de refino oxidante são a descarburização e a desfosforação. A descarburização é a reação de oxidação do carbono (contido no banho metálico) com o oxigênio injetado. É a reação mais importante, pois impõe o ritmo de produção. É durante esta fase que observa-se a formação de uma fumaça densa e avermelhada composta principalmente de óxidos de ferro. Este pó fino é proveniente principalmente da oxidação de elementos volatizados diretamente do banho, aos quais se juntam os finos de cal e carbono adicionados à corrida. À medida que é aumentada a velocidade de descarburização, aumenta a formação de CO, que é o agente transportador dos elementos volatizados que são posteriormente oxidados. A maior parte da poeira gerada ocorre nesta fase do processo (CAMPOS, 1985).

O PAE, junto com os gases formados, é captado por sistema de exaustão acoplado ao forno. O pó gerado é removido pelo sistema de despoeiramento até sua disposição em silos, onde posteriormente são transportados em caminhões para depósitos adequados (BARBOSA, 1993).

Em nível mundial, a produção de aço de aço foi de 831 milhões de toneladas no ano de 2001. No Brasil, a produção de aço bruto foi de 26,7 milhões de toneladas, das quais 4,5 milhões foram produzidas via forno elétrico a arco (IBS, 2002).

Segundo SOBRINHO e TENÓRIO (2000), na fabricação de aço são produzidos de 15 a 20 kg de PAE por tonelada de aço, ou seja, de 1,50% a 2,00%. Desta forma, estimando um coeficiente de 1,75% de PAE gerado por tonelada de aço fabricado, estima-se que a geração em 2001 tenha sido de aproximadamente 78 mil toneladas.

2.1 ALTERNATIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

O PAE contém predominantemente ferro, além de zinco, chumbo, cádmio e cromo em quantidades significativas. A maioria destes pós é oriunda da produção de aço carbono com uma menor quantidade de pós que se originaram durante a fabricação de aço inoxidável (SOBRINHO e TENÓRIO, 2000).

Estudos realizados por MONTOVANI et al. (1998) com três tipos de poeiras geradas em forno elétrico a arco (FEA) mostraram que são de granulometria muito fina, com partículas esféricas e de composição muito complexa, apresentando como elementos principais o Fe, Zn e Mn. DONALD et al. (1996) complementam que as partículas do PAE

estudadas possuíam geralmente tamanhos menores que 10 μm , enquanto que a maioria das partículas eram menores que 1 μm .

Segundo DONALD et al. (1996), o PAE contém em média 19% de zinco e 3% de chumbo em massa. Devido à presença deste chumbo, assim como pequenas quantidades de cádmio e cromo hexavalente, o PAE tem sido classificado como um resíduo perigoso por várias agências governamentais. Dentre estas agências, a EPA (1990) classificou as emissões de pós e lamas da produção primária do aço em fornos elétricos, definida pelo código K061, como resíduo sólido perigoso, assim como a NBR 10004 (ABNT, 1987).

Legislações mais restritivas quanto à disposição final do PAE têm levado as usinas que produzem aço a procurarem alternativas para o reprocessamento desse resíduo (MONTOVANI et al., 1998).

DONALD et al. (1996) citam que existem três categorias de processos alternativos de controle para o PAE: estabilização do pó sem recuperação dos metais, ou seja, dispostos em aterros para resíduos perigosos; estabilização do pó pela combinação com outros materiais; e método de tratamento para recuperação dos metais enquanto ocorre a estabilização do resíduo.

Segundo SOBRINHO e TENÓRIO (2000), as atuais alternativas disponíveis no Brasil para os fabricantes de aço quanto ao gerenciamento de pós de FEA incluem:

- Embarque em containers para processamento;
- processamento do material;
- venda para outras empresas;
- estabilização ou vitrificação para dispor ou vender o produto.

2.2 RECUPERAÇÃO DE METAIS PESADOS

Recentemente, produtos que contêm metais pesados, bem como estes metais, têm sofrido publicidade adversa em função do seu impacto ambiental (STUART, 1999).

Isso implicou exigências legais no sentido de que ocorresse redução no processo de emissões de grandes quantidades de produtos como pós e lamas das indústrias siderúrgicas. Os custos associados à segurança de disposição destes resíduos, necessitando os mesmos de pré-tratamento ou de técnicas de estabilização, elevam em muito os custos das empresas.

Estes fatores são incentivos para que as indústrias siderúrgicas recuperem óxidos e metais de valor no então chamado resíduo (YE et al., 1999).

Alguns tratamentos de pós são apresentados por XIA et al. (1999) e incluem: pirometalurgia, hidrometalurgia, bem como processos hidro e piro – metalúrgicos. Nestes processos, a meta é a recuperação de metais de alto custo em forma pura e concentrada. Normalmente, o estágio mais importante no processo é a separação do ferro dos metais não-ferrosos assim como zinco, chumbo e cádmio. Alguns destes processos foram testados em escala piloto; outros foram comercializados apenas durante um período, sendo abandonados posteriormente. Muitos dos processos disponíveis para o tratamento do PAE são pirometalúrgicos. Exemplos desses são os “*high temperature metals recovery*” (HTMR), que incluem: fornos rotativos e processos a plasma.

Os fornos cilíndricos rotativos e fornos de soleira circular rotativa trabalham em uma faixa de temperatura entre 1000 e 1400°C (YE et al., 1999).

O tratamento pirometalúrgico mais comum dado para o PAE é via forno Waelz, onde é produzido um óxido de Zn contendo entre 55 e 60% de zinco, que pode ser processado em um produto vendável, comumente placas de zinco, embora também possam ser produzidos óxidos de zinco com grau de pureza comercial (STUART, 1999).

STROIHMEIER et al. (1996)⁵, citados por SOBRINHO e TENÓRIO (2000), complementam que o processo Waelz pode processar mais de 1.000.000 t/ano de pós. Este processo consiste em misturar a poeira de aciaria elétrica com carvão e fundentes, onde ocorrem fenômenos de secagem e pré-aquecimento da carga, volatilização de álcalis e haletos, redução de óxidos de ferro, redução e volatilização de óxidos de zinco, chumbo e cádmio e posterior oxidação (acima da carga) para coleta destes óxidos. Os produtos produzidos são óxidos contaminados por chumbo e elementos halogênicos e um produto rico em ferro, que não é tóxico.

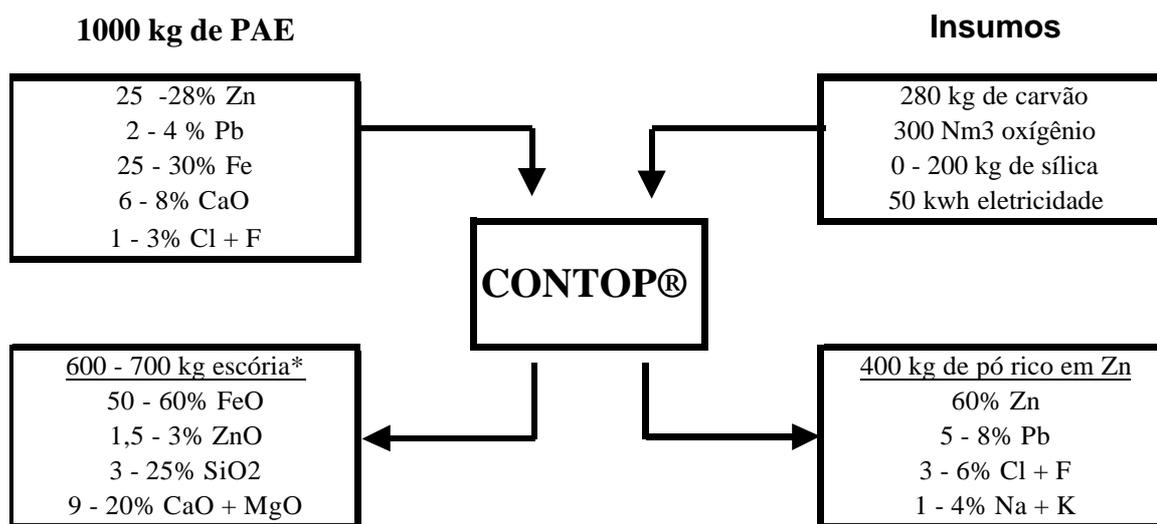
Muitos destes processos, assim como os fornos rotativos, requerem relativamente grandes toneladas do PAE para serem tratados de forma econômica e competitiva. O processo pirometalúrgico, em especial o de plasma, tem, além disso, altas taxas de consumo de energia (XIA et al., 1999).

Um dos mais novos processos para tratamento do PAE, apresentado por PESL et al. (1999), é o chamado CONTOP[®], onde os pós são diretamente injetados em um reator

⁵ STROIHMEIER G.; BONESTELL, J.E. Steelworks residues and the Waelz kiln treatment of electric arc furnace dust. Iron and Steel Engineer, v. 73, n.4, p-89-90, 1996.

ciclone, juntos com oxigênio e finos de carvões ou materiais contendo carbono, que servem ambos como um redutor e fonte de combustível. Não é necessário pré-tratamento. Outros resíduos, como as lamas, podem ser tratados com este processo, mas devem estar secos (menos de 2% de umidade) e possuírem partículas de grãos inferiores a 1mm.

Na figura 2, está representado um exemplo do desempenho do processo utilizando o CONTOP®, para o PAE.



* composição depende da adição da sílica

Figura 2 Balanço típico de materiais para tratamento de pós com o processo CONTOP® (PESL et al.,1999).

Conforme PESL et al. (1999), a pirometalurgia beneficia o Zn contido no PAE pelo processo de redução e evaporação do óxido de zinco, de acordo com as reações (1) e (2). A reação (1) é relevante para o processo escória-metal onde o carbono é dissolvido no metal, como no Forno Básico a Oxigênio; enquanto que a reação (2) descreve uma reação escória-gás ou sólido-gás. Normalmente, uma redução carbonácea é usada. Outras espécies voláteis como o chumbo, cádmio, álcalis e haletos também evaporam.



Na tabela 1, são apresentadas estimativas do potencial de zinco na sucata de aço e zinco recuperado, conforme STUART (1999).

Tabela 1 Estimativas do potencial de zinco na sucata de aço e sua recuperação no PAE.

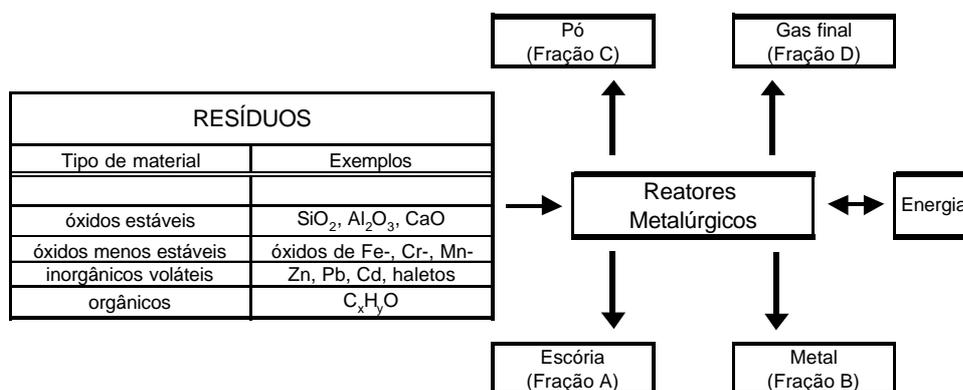
Potencial de zinco na sucata de aço e zinco recuperado (mil t/ano Zn)	
Zn na sucata recuperada	610
Zn contido nos PAE produzidos	
- Zn contido	565
- Zn recuperado	502
Zn recuperado do PAE	250
Zn recuperado como % de:	
Zn na sucata	41
Recuperação do Zn no PAE	50

Fonte: STUART (1999).

Como indicado na tabela 1, mais de 90%, ou seja, 565.000 das 610.000 t de zinco, contido na sucata, que é reciclada, são recuperadas pela indústria do aço no PAE. Mas, somente metade do zinco recuperado contido no PAE é recuperado pela indústria de zinco.

Para YE et al. (1999), muitos resíduos ou subprodutos são de natureza complexa com relação à sua composição, ao conteúdo de óxidos inorgânicos e metais, assim como aos materiais orgânicos. O processamento de resíduos complexos tem sido feito através do uso de reatores, em que, simultaneamente, são destruídos os componentes tóxicos com recuperação de metais pesados e energia.

Na figura 3, está esquematizado o processo com o uso de reatores metalúrgicos para resíduos complexos.

**Figura 3** Representação esquemática do processo com o uso de reatores metalúrgicos para resíduos complexos (YE et al.,1999).

As frações produzidas pelos resíduos complexos podem ser categorizadas dentro de quatro grupos, de acordo com a figura 3:

- A – óxidos estáveis que normalmente são incorporados na escória durante a fase do processo;
- B – óxidos menos estáveis que são reduzidos à fase metálica na presença de carbono;
- C – voláteis inorgânicos são volatizados e capturados no sistema de exaustores;
- D – materiais orgânicos sendo decompostos dentro do CO e H₂ e, posteriormente, sofrendo combustão.

Na tabela 2, são apresentadas as porcentagens de cada grupo citado acima, que estão presentes no PAE.

Tabela 2 Porcentagens dos grupos categorizados em função dos resíduos produzidos, presentes no PAE.

Fração	(%)
A	5
B	50
C	45

Fonte: YE et al.,1999.

Uma das dificuldades da recuperação dos metais pesados contidos no PAE é que o resíduo não contém somente ferro e metais não-ferrosos, mas também sódio, potássio, cloro e flúor. Combinação, essa, de elementos, que dificulta alguns processos que são desenvolvidos para recuperar metais de valor (XIA et al., 1999).

O maior impulso para o desenvolvimento do processo hidrometalúrgico para tratamento do PAE é que, em pequena escala, o processo inicial é econômico devido ao baixo capital e custo de operação. Utilizam-se, nesta operação, reagentes como a soda cáustica ou soluções ácidas. Entretanto, ambos apresentam dificuldades para decompor o Zn ferrítico do PAE. Desta forma, tanto o Zn quanto o Zn ferrítico podem não ser recuperados. Então, XIA et al. (1999) propõem um processo híbrido, sendo um processo pirometalúrgico para decompor o Zn ferrítico e obter a recuperação de metais não-ferrosos por técnicas de hidrometalurgia.

Na figura 4, está esquematizada a proposta de XIA et al. (1999) de um processo híbrido para o tratamento do PAE:

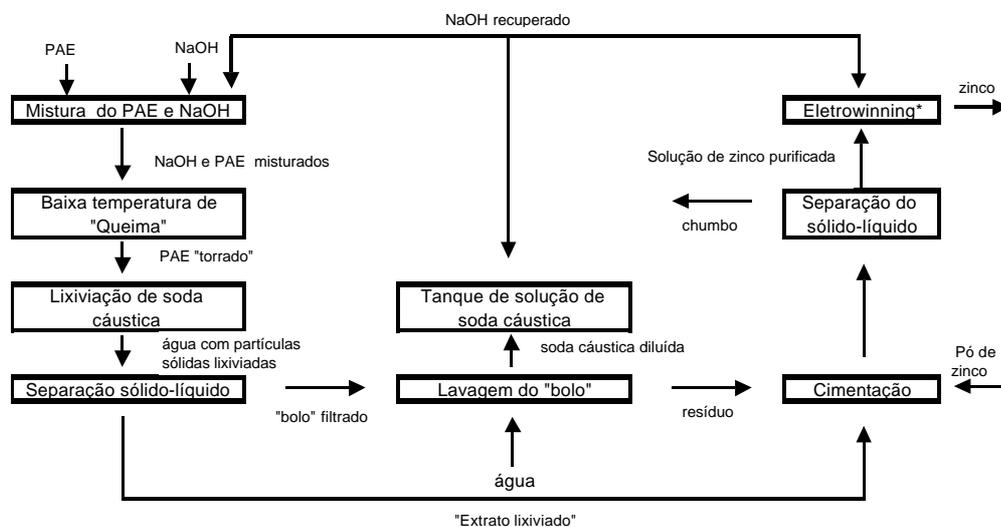


Figura 4 Proposta de um processo híbrido para tratamento do PAE (XIA et al., 1999).

Conforme XIA et al. (1999), o zinco ferrítico (ZnFe_2O_4) é transformado em zincato de sódio solúvel (Na_2ZnO_2) no processo pirometalúrgico de acordo com a reação representada na expressão 3:



Subseqüente, no processo de lixiviação, o produto zincato de sódio e o óxido de zinco do PAE original são dissolvidos de acordo com as reações 4 e 5:



Conforme o trabalho realizado por XIA et al. (1999), esquematizado na figura 4, o Zn recuperado no lixiviado foi de 95% enquanto que o Cd, o Pb e o Cr recuperados foram de aproximadamente 89, 65 e 80% respectivamente. Já o ferro recuperado foi menor que 1%. Observa-se que a temperatura no processo pirometalúrgico, neste caso, é inferior à 400°C e que a maior emissão no processo é de vapor d'água. Os metais não-ferrosos no lixiviado poderiam ser recuperados pela hidrometalurgia convencional ou técnicas eletrometalúrgicas.

* Eletrowinning – recuperação por eletrólise de metais na solução.

3 TECNOLOGIA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A solidificação diz respeito à técnica de encapsulamento de um resíduo em um sólido monolítico de alta integridade estrutural. O encapsulamento pode resultar em resíduos de finas partículas (microencapsulamento) ou em resíduos de maiores dimensões (macroencapsulamento). Solidificação não envolve, necessariamente, interações químicas entre o resíduo e reagentes solidificados, mas pode mecânica ou fisicamente ligar o resíduo dentro do monolito. Migrações de contaminantes são restringidas pelo vasto decréscimo da área superficial exposta para lixiviação e/ou pelo isolamento do resíduo dentro de uma cápsula impenetrável (EPA, 1990).

Já a estabilização refere-se à técnica que reduz o potencial perigoso de resíduos pela conversão dos contaminantes em uma forma menos tóxica, menos solúvel e menos móvel. As características do estado físico e de manuseio com resíduos não são necessariamente modificadas pela estabilização (EPA, 1990).

Ao longo deste trabalho, a Tecnologia de Solidificação/Estabilização será abreviada por S/S, abreviação, esta, adotada internacionalmente.

3.1 DESENVOLVIMENTO E USO DA TECNOLOGIA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

COCKE et al. (1992) apresentaram como início importante para a tecnologia de S/S a implementação do *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), 1976, nos EUA, onde o processo de S/S tem-se tornado essencial para tratamento de substâncias perigosas que não são eliminadas pelos meios de recuperação, incineração e/ou fontes de redução.

O Ato de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA) foi aprovado na emenda do Congresso Americano em 1976 como lei para regulamentar e delegar poderes às Agências de Proteção Ambiental para agir e orientar quanto à geração, classificação, transporte, tratamento e disposição de resíduos domésticos ou industriais, perigosos ou não. Um manual de uso destas regulamentações foi publicado pela primeira vez em 1990 e, desde então, passou por várias mudanças e correções, que espelham o processo de desenvolvimento das políticas públicas e privadas de controle de resíduos (EPA, 1997).

Para SANTHANAM et al. (1981), o estado de desenvolvimento dos processos de S/S se estende desde testes laboratoriais até a sua comercialização. São basicamente três métodos pelos quais estes processos podem melhorar a disposição dos resíduos:

- Com a melhoria das características físicas dos resíduos, aumentando, assim, a facilidade de manuseio. Isto tem como consequência um melhor controle/gerência da área de disposição, resultando em uma redução do impacto relacionado à estabilização física e contaminação de águas superficiais e subterrâneas;
- diminuindo a exposição do resíduo, devido à redução da área superficial e/ou permeabilidade, ou encapsulamento do resíduo, limitando, assim, o contato da água com o resíduo;
- através de reações químicas, reagindo com o resíduo, limitando a solubilidade dos constituintes químicos, evitando uma maior contaminação através da lavagem ou solubilização pela água.

WILES (1987) e COCKE et al. (1992) lembram que a tecnologia de S/S tem sido utilizada há aproximadamente 20 anos para manejar resíduos industriais e que, nesta tecnologia, empregam-se materiais selecionados (cimento Portland, cinza volante, calcário, entre outros) para alterar as características físicas e químicas dos resíduos classificados como perigosos, *a priori*, para dispô-los em aterros ou transformá-los em novos produtos.

Conforme COCKE⁶, citado por LIN et al. (1996), a complexidade dos processos de S/S resulta da combinação de efeitos da química do cimento com soluções de equilíbrio e processos cinéticos e fenômenos próximos da superfície. A interação entre o cimento e o resíduo necessita ser determinada e incorporada dentro de modelos detalhados do processo.

DANIALI (1990), VEMPATI et al. (1995) e COHEN et al. (1997) apresentaram que a tecnologia de S/S, utilizando cimento, é uma tecnologia atrativa para o tratamento de resíduos perigosos, pois o custo é baixo, em comparação aos processos pirometalúrgicos ou de incineração, por exemplo, e de fácil implementação. Para WILES (1987), isto é resultado da disponibilidade prévia de matérias-primas com baixo custo, como cinza volante, cimento, cal, entre outros, utilizados em um processo largamente conhecido, onde o equipamento

⁶ COCKE, D.L., J. Hazard. Mater., 24 (1990) 231

necessário para a realização desta tecnologia é de fácil manipulação e encontrado facilmente na indústria da construção.

Entretanto, COHEN et al. (1997) alertam que a utilização da tecnologia da S/S tem sido largamente utilizada em base empírica e que existe a necessidade de se melhorar o conhecimento dos mecanismos associados com o conteúdo dos resíduos sem o ligante, e o subsequente potencial para lixiviação dos resíduos para o produto sólido, e a deterioração do mesmo. De acordo estão STEGEMENN et al. (1996), que afirmam que, embora uma grande variedade de métodos de testes tenham sido desenvolvidos no mundo, não há um procedimento padrão para avaliar a eficácia do processo de solidificação e o risco para o meio ambiente que possa ser assegurado para disposição ou utilização dos produtos da solidificação. Além disso, COCKE et al. (1992) salientam que a tecnologia de S/S apresenta muitas lacunas em relação: ao comportamento da adsorção dos diferentes cátions metálicos nos materiais cimentantes; às trocas físicas e químicas que ocorrem como resultado da adsorção destes íons metálicos; ao efeito da estrutura cimentante na solidificação; e ao comportamento lixiviante dos diferentes cátions metálicos adsorvidos nestas substâncias. Para COHEN et al. (1997), estas informações são essenciais quando se busca um longo período de estabilização dos produtos S/S consignados para aterros ou para novos produtos nos quais são utilizados resíduos.

WILES (1987) argumenta que o papel da tecnologia S/S, que tem como objetivo direcionar resíduos perigosos com segurança para o meio ambiente, depende de ações reguladoras e subsequentes interpretações judiciais e da habilidade da tecnologia para encontrar critérios de desempenho que possam ser desenvolvidos.

Como em muitas jurisdições mundiais não há um procedimento para reclassificar um tratamento que faça com que um resíduo perigoso passe para uma forma não-perigosa, o Wastewater Technology Centre⁶, citado por STEGEMANN et al. (1996), propôs um protocolo de métodos de testes para solidificação de resíduos à base cimentante. A sugestão do método de teste examina separadamente os contaminantes como um resultado de sua especificação química, de seu potencial para baixa liberação dos elementos, baseado na sua mobilidade na matriz solidificada do resíduo e na durabilidade da matriz. O protocolo representa a primeira tentativa para desenvolver uma ferramenta gerencial para resíduos solidificados, que contabilize suas características físicas e lixiviantes, no contexto de diferentes cenários de deposição.

3.2 UTILIZAÇÃO DO PAE E DE METAIS PESADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Um resíduo pode apresentar possibilidades de aplicação em várias áreas. Entretanto, deve-se escolher as que se apresentem mais viáveis do ponto de vista técnico, ambiental e econômico. Neste sentido, a escolha do tipo de aplicação que poderá ser dado ao resíduo deverá levar em consideração as suas características físico-químicas, de maneira que possam ser aproveitados da melhor forma possível. Dentre as variadas possibilidades de aplicação de resíduos na construção, as mais frequentes são como agregado e como adição ao concreto. A primeira, por requerer dos resíduos apenas características mais comuns; a segunda, por proporcionar maior valor agregado ao material (MOURA, 2000).

A utilização do PAE na construção civil não é uma prática comum no mundo, pois este resíduo em países mais industrializados é submetido a processos com o objetivo de obter a recuperação de metais pesados, como foi apresentado no item 2.2. Entretanto, estudos na construção civil estão sendo realizados para avaliar o seu comportamento quando utilizado com cimento, assim como por BARBOSA (1993), AL ZAID et al. (1997), HAMILTON e SAMMES (1999), LEITE et al. (2000).

3.2.1 Composição química do cimento Portland e sua hidratação

Segundo NEVILLE (1997), os principais compostos do cimento Portland são: Silicatos tricálcico (C_3S), Silicatos dicálcico (C_2S), Aluminatos tricálcico (C_3A) e Ferroaluminatos tetracálcico (C_4AF). Em presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta de cimento endurecida. Os principais compostos de hidratação são silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que dão resistência à estrutura, e os hidróxidos de cálcio ($Ca(OH)_2$) que conferem o carácter alcalino às pastas de cimento.

⁶ Wastewater Technology Centre, 1991. Proposed evaluation protocol for cement-based stabilized/solidified wastes. Environment Canada. Report EPS 3/HA/9

3.2.2 Calor de hidratação e tempos de pega do cimento

Uma importante propriedade dos cimentos é o calor de hidratação. Este chega a liberar energia de até 500j/g de cimento. Como a condutividade térmica do concreto é relativamente pequena, ele pode se comportar como um isolante e, no interior de grandes massa de concreto, a hidratação pode resultar em grandes elevações de temperatura. Ao mesmo tempo, o exterior da massa de concreto perde pouco calor, de modo que se estabelece um acentuado gradiente de temperatura e, durante o resfriamento subsequente do interior, pode ocorrer uma fissuração séria. Para efeitos práticos, não é necessariamente a quantidade de calor de hidratação que preocupa, mas, sim, a velocidade com que esse calor se desprende (NEVILLE, 1997).

Os compostos do cimento Portland são produtos de reações a alta temperatura que não estão em equilíbrio e, por isso, estão em um estado de energia elevada. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de baixa energia e o processo é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor. Desta forma, as reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de calor pela hidratação dos compostos individuais podem ser usadas como índices de suas reatividades. Os dados de estudos de calor de hidratação podem ser usados para caracterizar o comportamento de pega e endurecimento do cimento e para prever a elevação da temperatura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Usando um calorímetro de condução, Lerch⁷, citado por MEHTA e MONTEIRO (1994), registrou a taxa de evolução de calor das pastas de cimento durante a pega e o período inicial de endurecimento. Um gráfico típico desses dados é mostrado na figura 5.

MEHTA e MONTEIRO (1994) explicam que, quando mistura-se o cimento com a água, ocorre uma rápida evolução de calor durante poucos minutos, pico A, ramo ascendente da figura 5, provavelmente representando o calor de dissolução de aluminatos e sulfatos. Entretanto, esta evolução de calor inicial termina rapidamente devido ao fato de a solubilidade dos aluminatos ser reduzida na presença de sulfatos em solução (pico A, ramo descendente). O ciclo seguinte, após aproximadamente quatro ou oito horas de hidratação para a maioria dos cimentos Portland, representa a formação da etringita⁸ (pico B, ramo descendente). Muitos

⁷ W. Lerch, proceedings Am. Soc. Test. Mat., Vol. 46,p.12252, 1946.

⁸ Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, um sulfoaluminato formado durante o processo de hidratação do cimento (NEVILLE, 1997)

pesquisadores acreditam que o período de evolução de calor inclui algum calor de dissolução devido ao C_3S e ao calor de formação de C-S-H. A pasta de um cimento com retardo de pega reterá muito de sua plasticidade antes do começo deste ciclo de calor e vai enrijecer e mostrar o *início de pega* (começo de enrijecimento) antes de atingir o ápice em B, o qual corresponde ao *fim de pega* (enrijecimento completo e início do endurecimento).

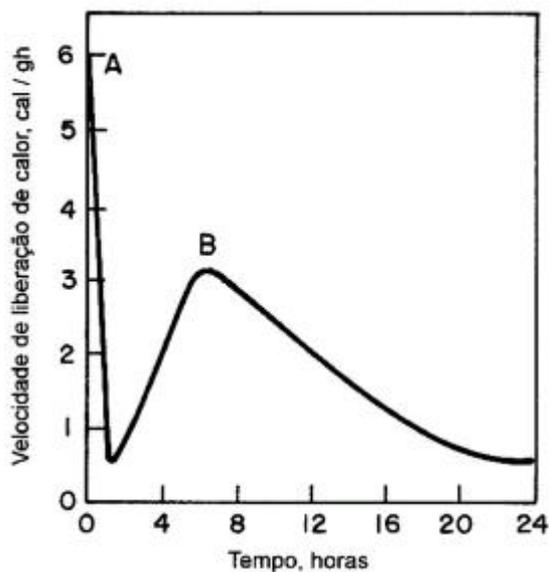


Figura 5 Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A definição de pega refere-se à mudança do estado fluido para um estado rígido. Embora, durante a pega, a pasta adquira uma certa resistência, para efeitos práticos, é importante distinguir pega de endurecimento, que se refere ao aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega (NEVILLE, 2000).

Na pesquisa realizada pela ABCP⁹ (1997), citado por DAL MOLIN e CREMONINI (2001), foram determinados valores médios de características dos tipos de cimentos nacionais em 1997. Entre as características analisadas, estavam os tempos de início e fim de pega, cujos valores podem ser conferidos na tabela 3.

⁹ Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) disponível em <http://www.abcp.org.br>

Tabela 3 Tempos de início e fim de pega para os diferentes cimentos Portland utilizados no Brasil.

Tempos de pega (h:m)	Tipos de Cimento						
	CP I S	CP II E	CP II F	CP II-Z	CP III	CP IV	CP V
Início	03:14	03:18	02:58	03:18	03:26	04:12	02:58
Fim	04:18	04:23	04:02	04:25	04:40	05:24	04:04

Fonte: ABCP (1997), citado por DAL MOLIN e CREMONINI (2001).

Conforme os resultados apresentados na tabela 3, o menor tempo de início de pega foi atingido pelos cimentos Portland CP II-F e V e o menor tempo de fim de pega, pelo cimento Portland composto CP II-F. Estas características dos cimentos são consagradas no seu uso e podem ser modificadas quando for necessário. Por exemplo, há aditivos aceleradores de pega, quando o objetivo é proporcionar que as reações de hidratação tornem-se mais rápidas proporcionando que peças sejam desformadas em menor espaço de tempo; e aditivos retardadores de pega, quando o objetivo é proporcionar que o concreto esteja fluido em um maior espaço de tempo.

A utilização de resíduos em materiais cimentantes ou pozolânicos tem sido estudada por diversos pesquisadores. Dentre estes, LEITE et al. (2000) utilizaram o PAE (teor de Zn de 13,1%) como adição em concretos em teores de 10%, 20% e 30% em relação à massa de cimento. A desmoldagem dos corpos-de-prova foi possível apenas 6 dias após a moldagem, pois eles desagregavam-se. Os autores determinaram os tempos de pega em pastas com substituição do cimento em teores de 10%, 20% e 30% pelo PAE e de pastas referência (0%), cujos resultados estão na tabela 4.

Tabela 4 Resultados dos tempos de início e fim de pega de pastas de cimento com substituição pelo PAE.

Teor de substituição (%)	Água de consistência (%)	Tempos de pega (h:m)		Limites da norma brasileira*	
		Início	fim	Início de pega	Fim de pega
0	30,0	02:42	4:49	≥ 1 h	≤ 10 h
10	26,5	01:17	12:56		
20	23,5	< 1	04:16		
30	24,6	< 1	02:32		

*NBR 11578 (ABNT, 1991)..

Fonte: LEITE et al. (2000).

Apesar de serem determinados os tempos de fim de pega das pastas contendo o PAE, as mesmas estavam apenas ressecadas e muito friáveis, fato que não ocorreu com a pasta de cimento referência (LEITE et al., 2000).

Como observa-se na determinação dos tempos de pega para pastas contendo o PAE, não há uma coerência dos resultados, pois o aumento da substituição diminuiu o tempo de início de pega, porém elevou-se o tempo de fim de pega para 10%. Por outro lado, para as pastas com 20% e 30% do PAE diminuíram os tempos de fim de pega em relação ao tempo da pasta referência. Desta forma, os tempos determinados para as pastas com o PAE não são representativos.

BARBOSA (1993) utilizou o PAE em pastas de cimento Portland composto CII-E/32, em substituição ao cimento nas proporções de 10% e 40%. Nas pastas, foram adicionados teores de cal hidratada dolomítica (41,78% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 42,12% de $\text{Mg}(\text{OH})_2$) em teores de 0% a 25%. Os resultados determinados pelos autores, para os tempos de início e fim de pega, assim como a água da pasta de consistência normal, encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 Determinação dos tempos de pega em pastas de cimento com substituição de cimento pelo PAE em teores de 10% e 40% e adições de cal hidratada em teores de 0% a 25%.

Teor (%)		Índice de consistência (% H_2O)	Tempos de pega (h:m)	
Cimento + PAE	Cal hidratada		Inicial	Final
90+10	0	24,8	04:35	09:25
	1	25,0	04:15	11:40
	5	26,0	04:05	15:45
	10	26,7	03:50	13:45
	15	27,6	03:15	10:00
	20	28,6	03:15	08:25
	25	30,4	02:55	07:45
60+40	0	20,0	03:00	20:05
	1	21,3	03:00	22:05
	5	22,0	03:00	27:30
	10	23,2	03:10	27:00
	15	24,6	02:40	20:20
	20	26,0	02:35	20:10
	25	27,0	02:25	19:50
CII – E/ 32		27,3	03:55	06:30

Fonte: BARBOSA (1993).

O acréscimo de substituição de cimento pelo PAE e uma maior adição da cal hidratada aceleraram as reações químicas iniciais para o enrijecimento da pasta. Logo, o

tempo de início de pega diminuiu, favorecendo o emprego deste “cimento alternativo” em peças pré-moldadas. Entretanto, o tempo de fim de pega sofreu um acréscimo considerável, principalmente com teores mais elevados do resíduo. Em relação ao teor de cal hidratada nas misturas compostas por cimento e PAE, observou-se que maiores teores de cal adicionados favoreceram tanto os tempos de início, quanto os de fim de pega. O PAE apresentava 6,4% (em massa) de Zn. Não foram detectados chumbo nem cromo (BARBOSA, 1993).

Semelhante pesquisa com PAE foi realizada por AL-ZAID et al. (1997), que verificaram que os tempos de pega para teores de substituição do cimento por PAE, menores que 1%, não apresentaram diferenças em relação à pasta de cimento referência. Entretanto, para teores maiores que 1% houve um retardo considerável nos tempos de pega. Quanto maior foi o teor de resíduo na pasta, maior o período para iniciarem as reações de hidratação.

AL-ZAID et al. (1997) também verificaram o perfil da temperatura média em argamassas sem PAE (0%) e com teores de 2% e 3%, como observa-se na figura 6.

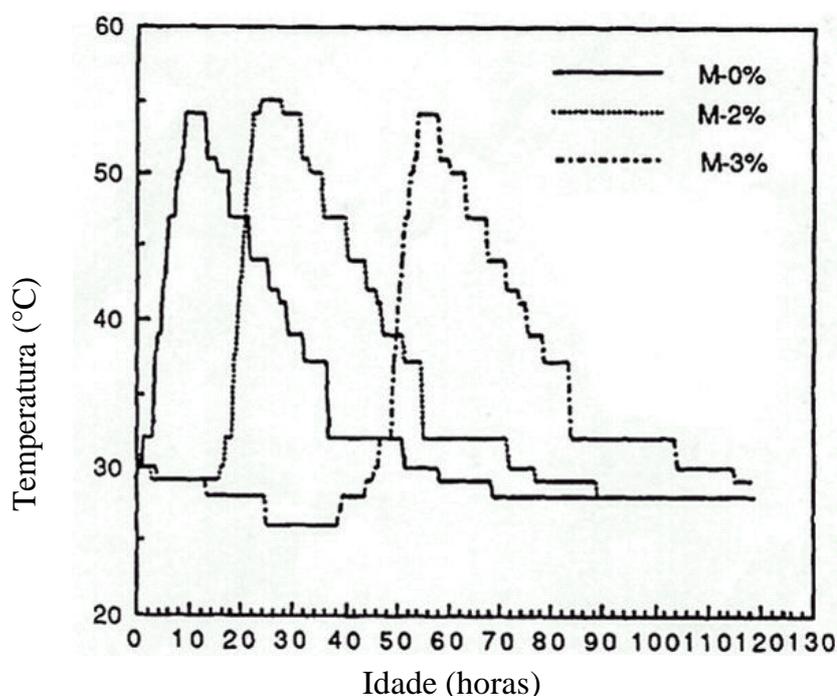


Figura 6 Perfil da temperatura média em argamassas referência (0%) e com teores de 2% e 3% do PAE (AL-ZAID et al., 1997).

O calor de hidratação em argamassas referência (0%), havendo substituição do cimento em teores de 2% e 3% pelo PAE, apresentou comportamento semelhante, entretanto defasados. Conforme figura 6, os picos de temperatura para argamassas referência (0%) e com

teores de 2% e 3% do resíduo foram atingidos em 10 , 24 e 54 h após a moldagem, respectivamente.

O efeito do PAE nos picos de temperatura é devido ao efeito retardador que ele causou na hidratação do cimento. A principal recomendação de AL-ZAID et al. (1997) é de que o PAE possa ser útil como um retardador de pega para o concreto. O resíduo apresentava 10,7% (em massa) de Zn, não sendo detectada a presença de Pb.

Tentando explicar o comportamento do PAE em pastas de cimento, HAMILTON e SAMMES (1999) utilizaram microscopia eletrônica por varredura (MEV) e difração de raios-x. O resíduo apresentava 49,8% e 4,9% (em massa) de Zn e de Pb, respectivamente.

Na tabela 6, estão descritos os resultados observados por análise de microscopia eletrônica por varredura em pastas de cimento (sem adições minerais) e pastas de cimento/PAE na relação 90:10, ao longo do tempo.

Tabela 6 Resultados com o MEV em pastas com cimento (sem adição) e pastas de cimento / PAE na relação 90:10, ao longo do tempo.

Idade (dias)	Pasta de cimento	Pasta cimento + PAE
1	Identificou-se a presença de silicatos de cálcio hidratado e $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	Identificou-se isoladamente a presença de partículas de cimento e do PAE. Entretanto, não foi observada a formação de produtos de hidratação.
3	Observou-se a presença de vazios com a formação e crescimento de silicatos de cálcio hidratado e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$; havia presença de grãos de cimentos dispersos na pasta.	Não se observou a formação de produtos de hidratação.
7	Observou-se a redução dos vazios com formação de “agulhas” de silicatos de cálcio hidratado .	Observou-se a formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em um longo arranjo de agulhas em uma direção; nestas “agulhas” foram observadas partículas do PAE; não foi identificada a formação de silicatos de cálcio hidratado.
14	Havia dificuldade em distinguir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e os silicatos de cálcio hidratados.	Observou-se, na micrografia de $5\mu\text{m}$, que a pasta apresentava a aparência de um cimento hidratado com grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Observou-se, também, grãos de cimento dispersos na pasta.

Fonte: HAMILTON E SAMMES, 1999.
PAE- pó de aciaria elétrica.

Na tabela 7, encontram-se os resultados por difração de raios-x obtidos em pastas de cimento contendo PAE.

Tabela 7 Resultados da difração de raios-x para pastas de cimento com diferentes teores do PAE, no 1° e 28° dias.

Composto Químico	Teor do PAE (%)				
	10	20	30	40	50
	1 d.d.c.	28 d.d.c.			
ZnFe ₂ O ₄					
Ca ₃ SiO ₅					
Ca ₃ SiO ₄					
Ca(OH) ₂					
ZnO					
Ca(Zn(OH) ₃) ₂ · 2H ₂ O					

PAE – pó de aciaria elétrica.

d.d.c – dias de cura ; detectado .

Fonte: HAMILTON e SAMMES, 1999.

Os resultados verificados na tabela 7 indicam que o Zn encontrava-se predominantemente na forma de ZnO e o ferro estava associado com o zinco, como óxido de ferro zinco (ZnFe₂O₄). E ainda, o ZnO estava presente na pasta com 10% de PAE no primeiro dia, e nas pastas com 28 dias apenas para as que possuíam teores com 40% e 50% do resíduo. Já o ZnFe₂O₄ estava presente em todas as amostras analisadas. Isto foi provavelmente devido ao fato de o ZnFe₂O₄ ser insolúvel em meio alcalino, enquanto que o ZnO é solúvel. Devido ao retardo das reações de hidratação do cimento provocadas pelo zinco, não foi detectado Ca(OH)₂ nas misturas com 40% e 50%. Observa-se que, quando o ZnO foi detectado na pasta, não estava presente o Ca(OH)₂ (HAMILTON e SAMMES, 1999).

Em trabalho complementar, para investigar a influência do Zn e do Pb no comportamento do pó em pastas de cimento, HAMILTON e SAMMES (1999) adicionaram, separadamente, ZnO e PbO em pastas de cimento que já continham PAE. As que receberam o acréscimo de ZnO apresentaram retardo, na hidratação do cimento, superior ao obtido pelas pastas contendo apenas PAE.

Na tabela 8, são apresentados os resultados obtidos, utilizando difração de raios-x para pastas de cimento com PAE com diferentes adições de ZnO, aos 28 dias de idade.

Tabela 8 Resultados de difração de raios-x, em pastas de cimento contendo PAE com diferentes adições de ZnO, aos 28 dias.

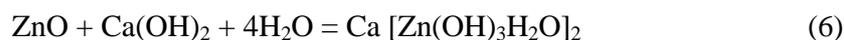
Composto Químico	Teor de ZnO em pastas de cimento contendo PAE(%)			
	1	5	10	20
Ca ₃ SiO ₅				
Ca(OH) ₂				
ZnO				
Ca(Zn(OH) ₃) ₂ . 2H ₂ O				

PAE – pó de aciaria elétrico a arco.

Detectado ████ .

Fonte: HAMILTON e SAMMES, 1999.

Observam-se nos resultados de difração, indicados na tabela 8, que para teores de ZnO de 1% e 5% em pastas de cimento, identificou-se o Ca(OH)₂, mas não compostos de zinco, possivelmente devido aos baixos teores utilizados. Entretanto, para teores de adição de 10% e 20% detectou-se hidrozincato de cálcio (expressão 6). Somente em pastas com 20%, identificou-se óxido de zinco.



A produção deste composto permitiria o reinício das reações de hidratação (HAMILTON e SAMMES, 1999).

Segundo POURBAIX¹⁰, citado por LI et al. (2001), em condições de pH elevado (>8), assim como em ambientes utilizando como ligante o cimento, espera-se que o zinco forme hidróxidos, conforme o equilíbrio na expressão 7:



LI et al. (2001) complementam que os complexos Zn(OH)₂²⁻ e Zn(OH)₅³⁻ podem estar presentes em uma forte solução alcalina. Suas propriedades aniônicas excluem sua adsorção sobre uma superfície negativa no C-S-H, mas eles podem formar com Ca²⁺ o complexo hidrozincato de cálcio hidratado (CaZn₂(OH)₆ . H₂O). Isto foi confirmado por

¹⁰ POURBAIX, M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, National Association of Corrosion Engineering, Houston, TX, USA, 1974

investigações com FTIR – Espectroscopia Infravermelha da Transformada de Fourier – em cimento com adições de Zn.

Na tabela 9, são apresentados os resultados obtidos, utilizando difração de raios-x para pastas de cimento com PAE com diferentes adições de PbO, aos 28 dias de idade.

Tabela 9 Resultados de difração de raios-x, em pastas de cimento com PAE com diferentes adições de PbO, aos 28 dias.

Composto Químico	Teor de PbO em pastas de cimento contendo PAE (%)			
	1	5	10	20
Ca ₃ SiO ₅				
Ca(OH) ₂				
ZnO				
Compostos de chumbo				

PAE – pó de aciaria elétrica.

Detectado .

Fonte: HAMILTON e SAMMES, 1999.

Diferentemente das pastas de cimento com PAE dosadas com ZnO, que apresentaram retardo no início das reações de hidratação, as pastas contendo PAE adicionadas com PbO apresentaram um leve fenômeno de aceleração. E, além disso, não foram detectados compostos de chumbo nestas pastas, mesmo com teor de 20% (HAMILTON e SAMMES, 1999).

Procurando avaliar a influência de diferentes metais pesados individualmente em argamassas, TASHIRO et al. (1977) verificaram que adições de 5% apresentaram resultados de inibição para a hidratação com os compostos de Cu, Zn e Pb. Já para adições de 0,5% , esta inibição foi insignificante para a hidratação dos compostos do cimento. Alguns compostos de chumbo aceleraram o efeito da hidratação. Este estudo mostrou que, para pequenas adições de metais pesados, o efeito foi positivo ou insignificante. Entretanto, se certo valor era ultrapassado, o efeito tornava-se negativo. O valor considerado crítico foi o de 5%. Os compostos de Cr, Cd e Hg foram identificados tendo insignificante efeito nas propriedades de endurecimento do cimento.

Num segundo trabalho, TASHIRO e OBA (1979) observaram os efeitos dos metais no calor de hidratação do C₃A¹¹. Compostos de Cu (OH)₂, ZnO e Cr₂O₃ retardaram o

¹¹ C₃A – Aluminato Tricalcico (3CaO.Al₂O₃). Um dos compostos principais do cimento Portland (NEVILLE, 1997).

calor de hidratação nas pastas de cimento. Para as pastas com adição de PbO, a hidratação foi retardada imediatamente depois da adição da água, mas foi acelerada alguns minutos depois.

ARLIGUIE ¹², citado por ARLIGUIE et al. (1982), observou a formação de hidrozincato de cálcio ($\text{Ca Zn}_2 (\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na zona de contato entre a pasta de cimento Portland e a armadura de aço recoberta por zinco.

Com o objetivo de estudar a formação do hidrozincato de cálcio, bem como o efeito retardador do zinco sobre a hidratação de pastas de cimento Portland, ARLIGUIE et al. (1982) realizaram diferentes composições com C_3S , C_3A , sílica e zinco. As percentagens dos elementos e compostos referentes a cada mistura são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 Composição das misturas utilizando C_3S , C_3A , Zn, sílica e água.

Nº da mistura	Compostos (%)				Relação Água/sólido
	C_3S	C_3A	zinco	sílica	
1	80	-	-	20	0,40
2	80	-	20	-	0,40
3	-	50	-	50	0,80
4	-	50	50	-	0,80
5	60	20	-	20	0,45
6	60	20	20	-	0,45

Fonte: ARLIGUIE et al. (1982).

A composição mineralógica das misturas confeccionadas, conforme percentagens indicadas na tabela 10, é mostrada na tabela 11.

¹² ARLIGUIE, G. Thèse de spécialité, Nancy (1975).

Tabela 11 Produtos de hidratação identificados por difração de raios-x nas diferentes misturas estudadas de C₃S, C₃A, Zn, sílica e água.

Idade da amostra no momento da observação	C ₃ S		C ₃ A		C ₃ S + C ₃ A	
	n° 1	n° 2	n.º 3	n.º 4	n.º 5	n.º 6
	sílica	zinco	sílica	zinco	sílica	zinco
3 h	-	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈	C ₄ AH _X	HZ
6h	-	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈	C ₄ AH _X Ca(OH) ₂	HZ C ₄ AH _X
9h	Ca(OH) ₂	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈ HZ C ₄ AH _X	C ₄ AH _X Ca(OH) ₂	HZ C ₄ AH _X
1 dia	Ca(OH) ₂	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈ HZ C ₄ AH _X	C ₄ AH _X Ca(OH) ₂	HZ C ₄ AH _X
3 dias	Ca(OH) ₂	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈ HZ C ₄ AH _X	C ₄ AH _X Ca(OH) ₂	HZ C ₄ AH _X
6 dias	Ca(OH) ₂	-	C ₂ AH ₈ C ₄ AH _X	C ₂ AH ₈ HZ C ₄ AH _X	C ₄ AH _X Ca(OH) ₂	HZ C ₄ AH _X Ca(OH) ₂

Ca(OH)₂ – hidróxido de cálcio

HZ – hidrozincato de cálcio (Ca Zn₂ (OH)₆ · H₂O)

C₄AH_X – aluminatos quaternários cujo raio característico varia entre 8,2 e 7,6 Å;

Fonte: ARLIGUIE et al. (1982)

Na mistura C₃S + zinco, o Ca(OH)₂ não foi identificado após várias semanas, pois a mistura não obteve pega. Já na mistura de C₃A + zinco, foram identificados aluminatos hidratados (C₂AH₈, C₄AH₁₃) e hidrozincato de cálcio, só que em proporções menores que as da mistura de C₃A + sílica. Para a mistura C₃S + C₃A + zinco, o hidrozincato de cálcio foi detectado 3 horas após a adição de água, sendo o primeiro composto a cristalizar-se. Já o Ca(OH)₂ foi observado apenas no sexto dia (ARLIGUIE et al., 1982).

A explicação, apresentada por ARLIGUIE et al. (1982), da utilização do zinco nos compostos quantificados na tabela 11 está relacionada às quantidades de íons Ca²⁺ e OH⁻ livre na pasta. Na pasta composta de C₃S + zinco, a liberação de íons hidróxidos perto da superfície dos grãos do C₃S levaria o zinco, em contato com esta zona, a precipitar-se como Zn (OH)₂. Como há um período de indução na hidratação normal do C₃S, isto permitiria a formação de uma película impermeável de Zn (OH)₂ ao seu redor. Com esta camada, não haveria mais trocas entre os grãos anidros, e isto explicaria o porquê de até os 6 dias não ser identificado o Ca(OH)₂. Entretanto, o Zn (OH)₂ não foi detectado na difração de raios-x. Isto, provavelmente pelo fato de ser amorfo ou ser uma quantidade pequena para ser detectada. Por outro lado, para as pastas compostas por C₃A + zinco, ARLIGUIE et al. (1982) explicam que, como as

reações são mais rápidas para o C₃A, formando hidratos hexagonais, estes não permitiram que após a formação do Zn (OH)₂ houvesse uma camada homogênea ao redor dos grãos, e sim uma camada heterogênea, permitindo a difusão da água e dos íons e, desta maneira, continuando as reações de hidratação. Com isso, o meio se enriqueceu em íons Ca²⁺ e OH⁻, e o hidróxido de zinco transformou-se em hidrozincato de cálcio, conforme a reação que segue:



No caso das pastas com C₃S + C₃A + zinco, como o C₃A não é bloqueado por completo pela camada de Zn (OH)₂, conforme ocorre com o C₃S, a sua hidratação enriquece a solução em íons Ca²⁺ e OH⁻, fornecendo estes íons necessários para transformar a camada amorfa de Zn (OH)₂ em hidrozincato de cálcio no C₃S e, assim, proporcionando o início de sua hidratação (ARLIGUIE et al., 1982).

ARLIGUIE et al. (1982) continuaram seus estudos avaliando a influência das percentagens de zinco sobre a hidratação do C₃S, utilizando difração de raios-x. Os resultados observados ao longo do tempo são mostrados na tabela 12.

Tabela 12 Influência da percentagem de zinco sobre a hidratação do C₃S.

Percentagem de pó de zinco	Idade (dias)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	P	P	P	P	P	P	P
0,5	-	-	HZ	P	P	P	P
2	-	-	-	-	-	-	HZ
5	Não foram identificados nem o HZ, nem o P						
10							
20							

P – Hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) ;

HZ – Hidrozincato de cálcio

Fonte ARLIGUIE et al. (1982)

Quando há a presença de sulfato e zinco, a hidratação do C₃A depende da quantidade do primeiro elemento. Para concentrações de sulfatos menores que 2,5%, o zinco propicia uma hidratação mais rápida do que se ele não estivesse presente. Isto porque quando a solução dos íons sulfato é esgotada, a etringita se decompõe e a hidratação do C₃A prossegue. A transformação em monossulfoaluminato de cálcio é acompanhada de cristalização de hidrozincato de cálcio e aluminato hexagonal C₂AH₈, vindo a tornarem-se aluminatos preponderantes (ARLIGUIE et al., 1990_a).

Entretanto, quando as concentrações de sulfatos são maiores que 2,5%, o SO_4^{2-} fica em excesso na solução. Desta forma, o $\text{Zn}(\text{OH})_2$ combinado com os sulfatos não forma a película amorfa, os grãos de C_3A são rodeados por uma camada de etringita, o que cessa a hidratação do C_3A . Conforme os autores, na presença de zinco a cristalização da etringita é mais fina, e isso permite um melhor recobrimento da superfície irregular dos grãos de C_3A , desacelerando fortemente a sua hidratação. Foi verificado que na presença do zinco este retardo da hidratação foi maior do que nas pastas sem a presença do metal (ARLIGUIE et al., 1990_a).

O fenômeno da diminuição do tamanho da etringita foi verificado também na pasta referência por COLLEPARDI et al. (1978), onde a combinação de gesso e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em pastas de C_3A foi a que mais retardou sua hidratação. A explicação dos autores foi que, com a presença do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o tamanho da etringita foi reduzido e isso proporcionou um melhor cobrimento dos grãos de C_3A . Depois de algumas horas, as etringitas cobrindo os grãos de C_3A transformaram-se em monossulfatos devido ao consumo de gesso, e a hidratação reiniciou.

ARLIGUIE e GRANDDET (1990_b) avaliaram a influência do Zn em pastas confeccionadas com 4 diferentes tipos de cimentos, cujas características químicas e mineralógicas encontram-se nas tabelas 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13 Composição química de 4 cimentos distintos, cada um identificado com um número.

Cimento	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO total	CaO livre	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Perda ao fogo
1	21,45	5,31	2,30	64,45	0,90	1,40	2,98	0,49	0,04	1,02
2	21,20	3,57	4,49	63,35	0,84	0,70	3,20	0,55	0,42	1,71
3	22,15	3,60	0,27	68,15	5,00	0,50	2,02	0,50	0,20	2,77
4	20,72	5,13	2,22	66,20	4,83	1,35	2,88	0,47	0,04	0,98

Fonte: ARLIGUIE e GRANDDET (1990_b)

Tabela 14 Composição mineralógica (potencial de Bogue) de 4 cimentos distintos, cada um identificado com um número.

Cimento	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1	48,1	25,2	10,4	7,1
2	61,6	18,8	1,4	14,2
3	52,8	23,7	9,1	0,8
4	46,5	24,3	10,0	6,9

Fonte: ARLIGUIE e GRANDDET (1990_b)

O cimento número 4 resultou da adição de 4,1% de CaO no cimento 1, adquirindo um teor de cal livre igual ao do cimento número 3.

Verificaram-se os tempos de início das reações de hidratação (monitorando-se o calor liberado) ao longo do tempo. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 15.

Tabela 15 Avaliação dos tempos de início das reações de hidratação (monitorando-se o calor liberado) de 4 cimentos distintos adicionados com zinco (horas).

Adição de zinco	Tipo de cimento utilizado			
	1	2	3	4
Sem	3	3,5	2	2,5
Com	31	>100	25	25,5

Fonte: ARLIGUIE e GRANDET. (1990_b)

Com difração de raios-x, identificou-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ antes de 1 dia nas pastas de cimentos n^{os} 3 e 4 com adição de zinco, e no fim de 5 dias na pasta de cimento n.º 1 com adição de zinco. Entretanto, para pastas de cimento n.º 2 com adição de zinco, não se identificou o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ depois de 15 dias. O fato de os cimentos 3 e 4 possuírem teores de cal livre superiores aos dos outros cimentos proporcionou um ambiente com maior número de íons Ca^{2+} e OH^- , favorecendo o reinício da hidratação do cimento com a transformação da camada amorfa de $\text{Zn}(\text{OH})_2$ em hidrozincato de cálcio. Cabe lembrar que a única diferença entre os cimentos 1 e 4 foi a adição de 4,1% de CaO neste último (ARLIGUIE e GRANDET, 1990_b).

Por outro lado, para uma pequena diferença na cal livre, mas uma grande diferença no teor de C_3A , observou-se que os cimentos 1 e 2 apresentaram diferenças no início de liberação de calor e não foi verificada a formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ após 15 dias para o cimento 2. Isto devido à transformação de parte do $\text{Zn}(\text{OH})_2$ amorfo em hidrozincato de cálcio, mas a quantidade de íons Ca^{2+} foi insuficiente para a reação total. A hidratação do C_3S permaneceu bloqueada, não sendo detectada a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A pasta não obteve pega. Isto mostra que a reação de hidratação do C_3A contribui para o enriquecimento da solução intersticial em íons Ca^{2+} e OH^- , ambos necessários à transformação do hidróxido de zinco em hidrozincato de cálcio. O comportamento similar das amostras 3 e 4, onde a composição não difere essencialmente, a não ser no teor de C_4AF , provou que este composto não apresentou papel determinante. Pelo contrário, uma forte percentagem deste composto no cimento 2 não permitiu o desbloqueio da reação de hidratação e não compensou o fraco teor de C_3A . Cimentos ricos em cal livre e em C_3A reduziram o efeito retardador do zinco, mas a cal livre

não deve estar presente em demasia, pois ela pode causar complicações secundárias quando ocorre sua hidratação (ARLIGUIE e GRANDDET, 1990_b).

Em outra pesquisa, semelhante às realizadas por ARLIGUIE e GRANDDET (1990_b), DIET et al. (1998) utilizaram dois cimentos Portland, cujas composições das fases são apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 Composição de fases de dois cimentos Portland Comuns.

cimento	Composição de fases (% em massa)							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	K ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	CaO livre
A	68,6	17,1	3,0	7,0	0,3	0,2	2,5	0,3
B	54,8	17,9	10,4	7,3	1,2	0,2	4,5	0,5

Fonte: DIET et al. (1998).

Uma solução sintética produzida em laboratório composta por 3,91% de Na, 9,78% de Zn, 6,12% de Cl e 74,80% de água foi adicionada, por DIET et al. (1998), aos cimentos A e B, resultando em duas pastas distintas. Na determinação dos tempos de início de pega das pastas A e B, os autores constataram diferenças significativas, conforme resultados apresentados na tabela 17.

Tabela 17 Tempos de início de pega para pastas moldadas com cimentos tipo A e B, após adicionada a solução de zinco.

Cimento Portland Comum	Tempo de início de pega (h:m)
A	> 1920:00 *
B	01:24

*80 dias.

Fonte: DIET et al. (1998).

A solução, contendo zinco, proporcionou efeitos opostos no tempo de início de pega para cada pasta de cimento, como foi observado na tabela 17. A pasta, contendo cimento B, foi acelerada, enquanto que na pasta, contendo o cimento A, o tempo de pega foi detectado depois de 80 dias. Segundo DIET et al. (1998), a principal diferença entre os cimentos foram os teores de C₃A. Possivelmente, o zinco tenha acelerado a hidratação dos aluminatos de cálcio, bem como prejudicado a hidratação dos silicatos. E além disso, dados cristalográficos das amostras da pasta A revelaram a ausência de produtos hidratados depois de um mês de cura em sala climatizada, exceto para etringita, que estava presente em pequenas quantidades. Os autores basearam-se nas informações de ARLIGUIE e GRANDDET (1990_b) para explicar

este comportamento. Lembrando que, com uma maior percentagem de C_3A , proporcionou que sua hidratação liberasse íons Ca^{2+} e OH^- e transformasse hidróxido de zinco em hidrozincato de cálcio. Como o cimento A possuía baixas percentagens de C_3A e de cal livre, não foi possível o rompimento da camada amorfa de hidróxido de zinco. Daí o porquê do tempo de início de pega ocorrer após 80 dias.

OLMO et al. (2001) adicionaram quatro óxidos metálicos em pastas de cimentos. Conforme análise dos resultados dos tempos de pega do cimento, o ZnO retardou severamente o início e o fim de pega. Em relação ao Fe_2O_3 , ele não afetou o tempo de pega do cimento. Para o Cr_2O_3 com teor de 2,5% e cimento de 97,5%, não houve influência na pega. Entretanto, na interação com outros metais, houve retardo na pega dos produtos. O PbO não teve efeito significativo em relação ao tempo médio do experimento, mas ele retardou o tempo de pega das pastas em relação às de referência.

Outro trabalho, utilizando 10% em massa de nitrato de chumbo e nitrato de zinco como adição em materiais com cimento Portland Tipo I (ASTM C150), foi realizado por COCKE et al. (1992). Eles observaram que tanto o zinco quanto o chumbo foram preferencialmente adsorvidos pela superfície do cimento com adição de nitrato de chumbo, retardando o tempo de pega em consequência do bloqueio das reações de hidratação pelos seus íons. Entretanto, TASHIRO et al. (1977) observaram que o chumbo, em um nível de 0,5%, agiu como um ligeiro acelerador no tempo de pega do cimento.

Já WANG e VIPULANANDAN (2000) solidificaram o Cr (VI) com Cimento Portland Tipo I (ASTM C150), que equivaleria, no Brasil, ao cimento Portland Comum (CPI), em concentrações de 0,5%, 2% e 5% (sobre a massa de cimento), na forma de K_2CrO_4 , e uma relação água/cimento de 0,5. Também moldou-se pastas referência (0%). Os resultados evidenciaram que o Cr (VI) retardou o tempo de pega do cimento, conforme os resultados da tabela 18.

Tabela 18 Efeito do Cr (VI) nos tempos de início e fim de pega do cimento Portland Tipo I (ASTM C150) utilizando agulha de Vicat.

Teor de adição K_2CrO_4 sobre a massa de cimento (%)	Tempos de pega (h:m)	
	Início	Fim
0	5:00	8:00
0,5	7:00	13:00
2,0	13:00	18:00
5,0	14:00	20:00

Fonte: WANG e VIPULANANDAN (2000).

A hidratação do cimento foi afetada pela presença de Cr (VI), pois parte do Ca^{2-} no cimento reagiu com o CrO_4^{2-} , formando o complexo cromato de cálcio (CaCrO_4) com baixa solubilidade (WANG e VIPULANANDAN, 2000).

Ao contrário dos autores apresentados anteriormente, BORDOLOI et al. (1998) adicionaram ZnO nas matérias-primas do cimento e as sinterizaram em temperatura de 1300°C. Na tabela 19, encontram-se os tempos de início e fim de pega para pastas de cimento isentas da adição de zinco, assim como com adição do óxido.

Tabela 19 Tempos de início e fim de pega em pastas com e sem adição de ZnO.

Cimento	Tempos de pega (h:m)	
	Início	Fim
Sem óxido de zinco	01:20	01:50
Com óxido de zinco	03:07	03:34

Fonte: BORDOLOI et al. (1998).

Semelhante trabalho foi realizado por MURAT e SORRENTINO (1996), que adicionaram quantidades de Cd, Pb, Cr, Zn nas matérias-primas do cimento Portland e do cimento Aluminoso. Na tabela 20, observa-se o comportamento dos tempos de pega para cada um dos tipos de cimento com as diferentes adições dos metais pesados.

Tabela 20 Comportamento dos tempos de pega do cimento Portland comum e do cimento Portland Aluminoso quando da adição em suas matérias-primas de Cd, Pb, Cr e Zn.

Adição	Cimento Portland	
	Comum	Aluminoso
Cd	xxxx	xxxx
Pb	xxxx	www
Cr	yyyy	xxxx
Zn	xxxx	www

xxxx retardo dos tempos de pega em relação aos da pasta de cimento sem adição;
 yyyy aceleração dos tempos de pega em relação aos da pasta de cimento sem adição;
 www tempos de pega equivalente aos da pasta de cimento sem adição.

Fonte: MURAT e SORRENTINO, 1996.

O cimento Portland adsorveu uma grande quantidade de Cd e Zn, tendo como conseqüência um aumento na pega e um decréscimo nas resistências do concreto. Além disso, encapsulou o cromo em um curto tempo de pega e altas resistências. Já o cimento Portland Aluminoso facilmente encapsulou o Cd e o Cr com um atraso na pega, mas com boa

resistência, e também o Pb com tempo de pega normal e resistência. Grandes quantidades de óxido de zinco tiveram um efeito maléfico na resistência do cimento Aluminoso (MURAT e SORRENTINO, 1996).

MOLLAH et al. (1995) propuseram um modelo chamado “*Modelo de Cargas Dispersas*” (*Charge Dispersal Model*) para explicar o retardo nos tempos de pega causado por alguns metais pesados. Nas reações iniciais de hidratação, os elementos mais abundantes são os Ca^{2+} . Estes rodeiam a camada do C-S-H (camada negativa) e são preferentemente adsorvidos devido à sua alta densidade para formar uma camada de carga positiva. A camada negativa do C-S-H, combinada com a positiva do Ca^{2+} , forma a camada elétrica dupla (*Electrical Double Layer*). Já a camada de C-S-H, os íons de Ca^{2+} e os ânions de hidróxido de zinco formam uma tripla camada (*Tri-Layer of Diffuse Íons*). Os autores ilustraram o mecanismo do modelo de cargas dispersas para o zinco, quando o pH é maior que 13 e os íons de $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ são compostos dominantes. A difusão da nuvem de íons, portanto, é dominada pelos íons OH^- , $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$ e $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$. Na figura 7, observa-se a formação das camadas dupla e tripla. Os íons contidos nestas camadas estão distantes de alguma interação específica com a superfície e, uniformemente dispersos, cobrem completamente a superfície de C-S-H. Esta dispersão uniforme dos ânions de zinco sobre a superfície do C-S-H pode conduzir às seguintes reações:



(cobrindo uniformemente o C-S-H)



(cobrindo uniformemente o C-S-H)



(cobrindo uniformemente o C-S-H)

De qualquer modo, em um ambiente alcalino, como a pasta de cimento, as reações (10) e (11) são provavelmente dominantes conforme as reações termodinâmicas. Segundo

MOLLAH et al. (1995), este modelo explica o retardo da hidratação do cimento por espécies como Zn e Cd. O retardo dos tempos de hidratação do cimento é consequência da competição entre íons de Ca^{2+} e ânions de hidróxido metálicos no sistema. É a alta concentração de íons de Ca^{2+} que controla a formação do hidrozincato de cálcio. Quando há presença suficiente de íons de Ca^{2+} na solução, ânions de hidróxido de zinco $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$ e $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ são transformados em $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Estes cobrem completamente os grãos de cimento com uma camada impermeável e, assim, inibem novas reações de hidratação. A formação do hidrozincato como responsável pelo retardo nos tempos de pega do cimento não estaria de acordo com as pesquisas realizadas por ARLIGUIE (1990) e HAMILTON E SAMMES (1999), que evidenciaram que, quando houvesse a transformação do $\text{Zn}(\text{OH})_2$ para hidrozincato de cálcio, iniciariam-se as reações de hidratação. GREENWOOD et al.¹³, citado por MOLLAH et al. (1995), sugerem que os aquosos químicos das espécies iônicas de Ba^{2+} , Ag^+ , Hg^{2+} e Cr^{3+} não formam cargas negativas em um ambiente altamente alcalino como a pasta de cimento. Portanto, é esperado que o comportamento destes íons seja diferente dos cátions de Zn^{2+} e Cd^{2+} . Para MOLLAH et al. (1995), a formação do hidrozincato de cálcio e do composto de cádmio na superfície dos grãos de cimento é controlada pela carga na superfície e, aparentemente, pelo progresso do mecanismo de dois estágios, que são a formação das camadas dupla e tripla.

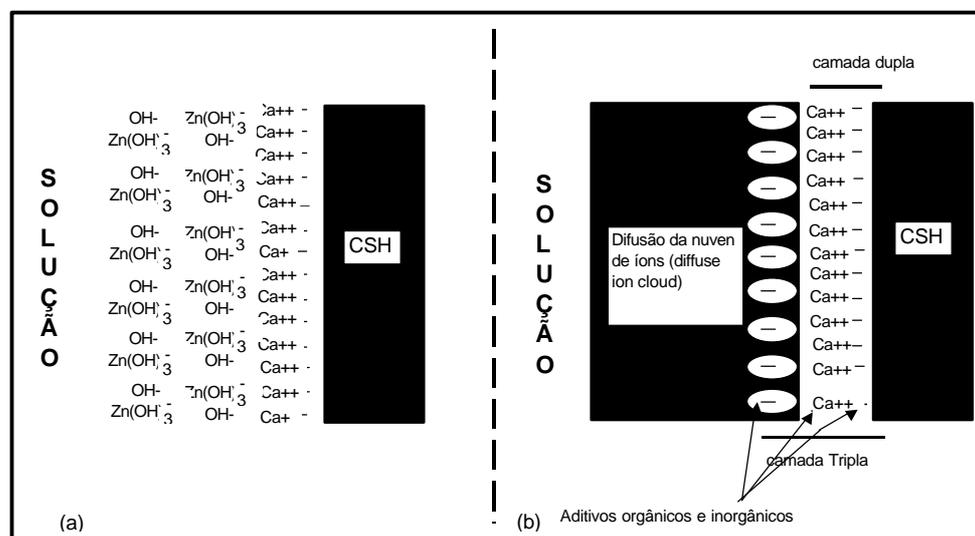


Figura 7 (a) modelo de carga dispersa para a superfície de zincato de cálcio cobrindo o C-S-H e (b) o modelo geral, apresentando a importância de íons de cálcio e a zona de influência dos aditivos orgânicos e inorgânicos (MOLLAH et al., 1995)

¹³ GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. Chemistry of the Elements. Pergamon, New York (1984)

Observou-se que o PAE contribuiu para um aumento dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento. Isto se deve à composição química do resíduo, composto de diferentes óxidos metálicos que, sozinhos ou combinados, interferem nas reações de hidratação do cimento. Isto provavelmente está relacionado ao elemento zinco, contido no PAE, que contribui para o retardo dos tempos de pega. Não existe um consenso sobre qual composto é responsável pelo retardo de pega, pois, de um lado, a literatura sugere que os possíveis responsáveis sejam ou o hidróxido de zinco, ou o hidrozincato de cálcio. Por outro lado, não se descarta a possibilidade de outros elementos (Cr, Pb, Cd, etc.), dependendo das concentrações e das fases em que se encontram na pasta de cimento, de influenciarem positiva ou negativamente a hidratação do cimento. Também verificou-se que a composição química do cimento, na presença de determinados elementos metálicos, influencia em maiores ou menores tempos de pega.

BREHM_b (200?) está realizando estudos do PAE em pastas de cimento com o objetivo de determinar as possíveis causas do retardo da pega do cimento.

3.2.3 Propriedades mecânicas

Com o propósito de avaliar o comportamento de resíduos nas características mecânicas de materiais cimentantes, autores como HAMILTON e SAMMES (1999) investigaram as propriedades mecânicas de materiais contendo cimento Portland com pós de aciarias elétricas.

Na tabela 21, são apresentados os valores de resistência à compressão, ao longo do tempo, de pastas de cimento puro e pastas com substituições de cimento pelo PAE em teores de 1%, 5% e 10%, respectivamente. O PAE utilizado continha 49,8% de Zn.

Tabela 21 Resistência à compressão em pastas de cimento puro e pastas com distintos teores do PAE ao longo do tempo.

Idade (dias)	Resistência à Compressão em pastas de cimento com PAE (MPa)			
	Teor de PAE em substituição ao cimento em (%)			
	0	1	5	10
3	30	35	7	2
7	41	51	50	20
28	57	62	62	51
56	60	68	65	60

Fonte: HAMILTON e SAMMES, 1999 / PAE – pó de aciaria elétrica.

Constata-se, na tabela 21, que para a substituição de 1% do cimento pelo PAE, os valores de resistência à compressão foram superiores aos da pasta referência em todas as idades analisadas. Porém, com o acréscimo do teor do PAE, os valores de resistência são inferiores aos da pasta referência nas idades iniciais. Isto se deve ao efeito retardador que o resíduo causou na hidratação do cimento. Entretanto, com idade de 7 dias, a pasta contendo 5% do PAE apresenta resistência superior à pasta referência e com idade de 56 dias, a pasta contendo 10% do PAE apresentou igual resistência à pasta referência, demonstrando que o resíduo está contribuindo quimicamente para o acréscimo da resistência ao longo do tempo.

Complementando estes dados, HAMILTON e SAMMES (1999) avaliaram a resistência à compressão em pastas de cimento com PAE's, os quais continham distintos teores de zinco: um contendo 37,6 %; o outro, 49,8%. O estudo foi realizado para fins de substituição de 10% do cimento pelo resíduo. Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na tabela 22.

Tabela 22 Resistência à compressão em pastas de cimento puro e pastas com diferentes resíduos siderúrgicos, ao longo do tempo.

Idade (dias)	Resistência à Compressão em pastas de cimento (MPa)		
	Teor do resíduo em substituição ao cimento em (%)		
	0	10	
	Referência	PAE (37,6 % de Zn)	PAE (49,8% de Zn)
3	30	0	2
7	41	27	20
28	57	42	51
56	60	45	60

PAE – pó de aciaria elétrica.

Fonte: HAMILTON E SAMMES, 1999.

Comparando os resultados de resistência à compressão das pastas contendo PAE com distintos teores de Zn, conforme tabela 22, observa-se que a pasta contendo o PAE com 49,8% de Zn, a partir dos 28 dias, obtém melhor desempenho que a pasta que contém o PAE com 37,6% do metal, e, a partir dos 56 dias, iguala-se a resistência da pasta referência. Desta forma, provavelmente por efeito químico, o zinco contribui para o aumento da resistência à compressão em idades superiores.

Procurando avaliar o comportamento de metais pesados em pastas de cimento na resistência à compressão, OLMO et al. (2001) selecionaram 4 óxidos metálicos: óxido de zinco, óxido de ferro (III), óxido de cromo (III) e óxido de chumbo, para serem adicionados às

pastas. O ZnO proporcionou uma baixa resistência à compressão nas amostras para idades de 7 e 28 dias. Entretanto, este efeito diminuiu com o aumento da idade, pois as amostras atingiram maiores resistências à compressão. O Fe₂O₃ não influenciou a resistência à compressão das amostras ao longo do tempo. O Cr₂O₃ não afetou a resistência à compressão das amostras, entretanto observou-se um pequeno decréscimo aos 56 dias de idade. O PbO não afetou a resistência à compressão das amostras ao longo do tempo.

HAMILTON e SAMMES (1999) adicionaram, em pastas de cimento (sem adição), ZnO e PbO, e avaliaram o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo. Na tabela 23, verificam-se os valores da resistência à compressão para pastas de cimento contendo ZnO e PbO, ao longo do tempo.

Tabela 23 Resistência à compressão, ao longo do tempo, para pastas de cimento com substituição de cimento (em teores de 1% e 5%) por ZnO e PbO.

Idade (dias)	Resistência à Compressão em pastas de cimento (MPa)				
	Teor do óxido metálico em substituição ao cimento em (%)				
	Referência	ZnO	PbO	ZnO	PbO
	0	1		5	
3	30	35	28	0	30
7	41	50	40	22	48
28	57	65	59	60	65

Fonte: HAMILTON e SAMMES (1999)

Pela análise dos resultados de resistência à compressão, conforme tabela 23, observa-se que a substituição de 1% do cimento pelos óxidos de zinco contribuiu para um melhor desempenho mecânico nas três idades analisadas. Porém, com o acréscimo do teor de substituição (5%), contribuiu para que as pastas contendo óxidos de chumbo obtivessem maiores resistências nas idades analisadas. Desta forma, verifica-se que o teor de substituição do cimento por determinado óxido influencia no desempenho mecânico das pastas.

BORDOLOI et al. (1998) adicionaram ZnO nas matérias-primas do cimento. A temperatura de sinterização foi de 1300°C. Ensaio de resistência à compressão para pastas de cimentos com adição de ZnO apresentaram um aumento na resistência para as idades de 3 e 7 dias quando comparadas às pastas sem adição do óxido. Entretanto, para as pastas com adição, este aumento não foi significativo entre os 7 e 28 dias, como pode ser verificado na tabela 24.

Tabela 24 Resistência à compressão em pastas de cimento com e sem adição de ZnO, ao longo do tempo.

Idade (dias)	Resistência à Compressão em Pastas de cimento (MPa)	
	com adição de ZnO	sem adição de ZnO
3	19,6	18,0
7	28,2	25,8
28	28,4	43,1

Fonte: BORDOLOI et al. (1998).

Ao contrário das observações verificadas nos valores de resistência à compressão para pastas de cimento que continham zinco, na tabela 24 nota-se que as pastas com o ZnO não obtiveram crescimento significativo na resistência entre os 7 e 28 dias. Este comportamento pode estar relacionado à variabilidade do ensaio.

Utilizando pastas de C₃A, TASHIRO e OBA (1979) adicionaram soluções de metais pesados. Na tabela 25, são mostrados os valores da resistência à compressão (MPa) para pastas com e sem adição de metais pesados. Em relação à resistência das pastas com adição de Cr₂O₃, houve uma variabilidade ao longo do tempo. Para Cu (OH)₂ e ZnO, os níveis de resistência foram bons, assim como o seu acréscimo ao longo do tempo. Entretanto, para o PbO, observaram-se baixas resistências até 28 dias, em relação às resistências das pastas com outras adições.

Tabela 25 Resistência à compressão, ao longo do tempo, em pastas de cimento contendo diferentes metais pesados.

Compostos	Resistência à compressão em pastas de cimento com adições de compostos metálicos (MPa)				
	Idade (dia)				
	1	3	7	14	28
Sem adição	3,2	5,1	5,5	10,2	6,0
Cr ₂ O ₃	5,3	6,7	8,1	6,2	7,1
Cu (OH) ₂	4,6	6,5	6,8	9,5	9,0
ZnO	4,7	5,9	7,2	9,1	9,5
PbO	0,5	0,5	1,7	1,5	1,5

Fonte: TASHIRO e OBA (1979).

As adições utilizadas afetaram as concentrações de Ca(OH)₂ e alumina na fase líquida da pasta, além da composição e estrutura dos compostos (TASHIRO e OBA, 1979).

WANG e VIPULANANDAN (2000) avaliaram a influência do Cromo (VI) em pastas de cimento Portland Tipo I (ASTM C150), que equivaleria, no Brasil, ao cimento

Portland Comum (CPI), em concentrações de 0,5%, 2% e 5% (na forma de K_2CrO_4) em massa de cimento. Também foram moldadas pastas de cimento referência. Em ensaios de resistência à compressão, realizados aos 28 dias, verificaram os autores, que a resistência à compressão é inversamente proporcional à adição de cromo. Para as pastas referência, a resistência foi de 41MPa. Para pastas de cimento com 0,5%, 2% e 5% de cromo, as resistências à compressão foram de 32, 26 e 23 MPa, respectivamente.

Já MURAT e SORRENTINO (1996) adicionaram quantidades de Cd, Pb, Cr, Zn às matérias-primas do cimento Portland comum e do cimento Portland Aluminoso, originando-se diferentes cimentos com cada elemento. Foram moldadas pastas com relação a/c de 0,4. Verificaram qualitativamente as resistências à compressão 24 horas após a moldagem das pastas, conforme podem ser verificadas na tabela 26.

Tabela 26 Verificação qualitativa da resistência à compressão com idade de 24 horas em pastas de cimentos Portland comum e Aluminoso, quando da adição em suas matérias-primas de metais pesados.

Adição	Cimento Portland	
	Comum	Aluminoso
Cd	xxxx	www
Pb	xxxx	www
Cr	yyyy	www
Zn	xxxx	xxxx

xxxx pastas com 24 horas apresentaram valores de resistência à compressão inferiores quando comparados aos das pastas sem adição;

yyyy pastas com 24 horas apresentaram valores de resistência à compressão superiores aos das pastas sem adição;

www pastas com 24 horas apresentaram valores de resistência à compressão equivalentes aos das pastas sem adição.

Fonte: MURAT e SORRENTINO, 1996.

Conforme IMLACH¹⁴ e TERRAMOTO¹⁵, citados por MURAT e SORRENTINO (1996), o cromo conduz a um aumento da resistência em idades iniciais. Entretanto, verificaram que o cromo influenciou na diminuição da resistência próxima aos 28 dias. Constataram, também, que o cádmio retardou os tempos de pega do cimento, mas não afetou a resistência após 24 horas.

Segundo BARBOSA (1993), os resultados no ensaio de resistência à compressão de argamassas com uso do PAE foram satisfatórios quando comparados às argamassas referência. Aos 28 dias de idade, o valor mínimo encontrado de resistência à compressão foi de 27,9 MPa para a mistura composta por: 75% de cimento + 25% do PAE + 25% de cal hidratada; o valor máximo encontrado foi de 38,1 MPa para a mistura composta por: 90% de cimento + 10% do PAE + 0% de cal hidratada. O traço 1:3 (PAE:cimento) apresentou, nas primeiras idades, uma resistência à compressão baixa (1,3 MPa), porém, em idades superiores (28 dias), a resistência foi igual a 34,9 MPa. Este traço seria o mais indicado pelo fato de haver um maior consumo do resíduo e menor consumo de cimento.

TASHIRO et al. (1977) moldaram argamassas contendo diferentes metais pesados e avaliaram o desempenho quanto à resistência à compressão para dois teores de adição: 0,5% e 5% em relação à massa de cimento, nas idades de 3 e 28 dias. Também foram moldadas argamassas referência (sem adição de metais pesados). Na tabela 27, encontram-se os resultados da resistência à compressão para às argamassas referência e as resistências relativas das argamassas com adição em relação as argamassas referência (resistência da argamassa de referência/resistência da argamassa com adição de metal pesado).

¹⁴ IMLACH, J. "Assessment of the role of chromium in Portland cement manufacture" Ceramic Bulletin 54, 5, 519-522, (1975).

¹⁵ TERRAMOTO H.; KASAGAWA T. "Method for producing cements which reach an extraordinary high early strengths" German Patent 2042749, (1971).

Tabela 27 Resistência à compressão para argamassas referência e resistência relativa da argamassa com adição de metal pesado em relação à resistência da argamassa referência.

Compostos Metálicos	Teor de Adição de metais pesados em argamassas de cimento (%)			
	0,5		5,0	
Idade (dias)	3	28	3	28
Sem adição*	(25,6)	(42,8)	(25,6)	(42,8)
Cr ₂ O ₃	99	90	101	102
CrO ₃	96	85	105	84
Cu(OH) ₂	90	80	1	106
CuS	111	115	7	97
Zn(OH) ₂	113	102	3	78
ZnS	106	99	27	120
As ₂ O ₃	98	85	70	56
Cd(OH) ₂	111	81	95	90
CdS	104	91	116	113
HgO	112	93	93	98
HgS	107	89	92	97
PbO. Pb(OH) ₂	125	131	2	108
PbS	114	111	2	96

*no caso "sem adição" a resistência à compressão é dada em (MPa).

os outros dados são apresentados em resistência relativa (%) (resistência da argamassa referência / resistência da argamassa com adição de metal pesado* 100).

Fonte: TASHIRO et al. (1977).

Observa-se, conforme tabela acima que, para alguns compostos, tais como CuS, Zn(OH)₂, PbS, o acréscimo do desempenho mecânico em relação à referência só foi possível com baixas concentrações (0,5%) adicionadas. Por outro lado, o acréscimo de resistência em relação à argamassa referência, para alguns compostos, tais como Cr₂O₃ e CdS, só foi possível quando elevou-se os teores adicionados (5%). Também verificou-se que as argamassas contendo As₂O₃ não apresentaram acréscimo de resistência, quando comparadas às argamassas referência, em nenhum dos teores adicionados e em nenhuma das idades analisadas. Desta forma, quando se utilizam compostos metálicos em argamassas, deve-se analisar quais compostos podem proporcionar o melhor desempenho mecânico, bem como qual a concentração mais eficiente para obter este desempenho.

Estudo em concreto, utilizando PAE (contendo em média 10,7% de Zn), foi realizado por AL-ZAID et al. (1997). As quantidades de materiais utilizadas estão apresentadas na tabela 28. Houve substituição do cimento pelo PAE em teores 2% e 3%, sendo, também, confeccionadas amostras referência (0%).

Tabela 28 Quantidade de materiais, utilizando o PAE em substituição ao cimento, para a confecção de concretos, assim como amostra referência (0%).

Cimento (kg/m ³)	Relação a/c	Água (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)		Areia (kg/m ³)	PAE	
			10 mm	20 mm		(kg)	(%)
350	0,62	217	390	730	715	0,0	0,0
343	0,63	217	390	730	715	7,0	2,0
339	0,64	217	390	730	715	10,5	3,0

Fonte: AL-ZAID et al., 1997.
PAE – pó de aciaria elétrica.

Os corpos-de-prova foram submetidos a três condições distintas de cura: submersa em água; em sala climatizada com temperatura média de 30°C e umidade relativa de 50%; e em sala climatizada com temperatura média de 55°C e umidade relativa de 5%. Após cada condição de cura, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de compressão, tração e abrasão.

Os resultados apresentados nos ensaios de resistência à compressão mostraram melhores desempenhos para concretos com teores de PAE em substituição ao cimento. Os concretos com 3% do resíduo obtiveram as maiores resistências à compressão, seguidos daqueles com 2% e do referência, respectivamente, para as três condições de cura realizadas. Na tabela 29, apresentam-se os valores de resistência à compressão (MPa) para corpos-de-prova curados imersos na água.

Tabela 29 Valores de resistência à compressão para concretos curados imersos em água, contendo teores do PAE, em substituição ao cimento de 2% e 3% e os referência (0%).

Idade (dias)	Resistência à Compressão em concretos (MPa)		
	Teor do PAE em substituição ao cimento em (%)		
	0	2	3
3	16	17	17
7	20	23	25
28	25	28	30
90	30	30	36
210	30	32	35

PAE – pó de aciaria elétrica.
Fonte: AL-ZAID et al., 1997.

Para os resultados de ensaio à tração realizados nos corpos-de-prova, submetidos às condições de cura descritas anteriormente, da mesma forma que o ensaio de compressão, o concreto com 3% de substituição de cimento pelo PAE obteve maior resistência seguido do de 2% e do referência. No ensaio de abrasão, a perda de massa foi ligeiramente inferior para os

concretos com teor de substituição de 2% e 3% do PAE do que para o concreto que não possuía o resíduo. De uma forma geral, o uso do PAE melhorou as propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão, à tração, à abrasão) sem nenhum efeito colateral (AL-ZAID et al., 1997).

Desta forma, em relação ao PAE, pode-se verificar que a sua adição em corpos-de-prova de pastas de cimento, argamassas e concretos contribuiu para o aumento do desempenho mecânico, quando comparado aos referências. Porém, algumas vezes o acréscimo do desempenho só foi verificado com o aumento da idade das amostras, em função da composição química do resíduo e do teor utilizado.

Segundo a bibliografia (HAMILTON e SAMMES (1999), BORDOLOI et al. (1998), TASHIRO e OBA (1979), MURAT e SORRENTINO (1996)) a utilização de metais pesados em pastas e argamassas apresentaram comportamento variado. De uma maneira geral, o Zn afetou a resistência em baixas idades, provavelmente em função do retardo de pega que causa na pasta de cimento, mas contribuiu para o acréscimo da resistência com o aumento da idade das amostras. Já a presença de Cr, na grande maioria dos trabalhos verificados, contribuiu para o decréscimo na resistência. O Pb, de uma forma geral, em baixas concentrações (0,5 a 1,0%), contribuiu para a melhoria do desempenho mecânico das amostras. Para o Cd, observou-se uma tendência de melhoria no desempenho mecânico das amostras. Porém, este comportamento está provavelmente associado à concentração do resíduo com o tipo de cimento utilizado.

3.2.4 Caracterização ambiental

No Brasil, a classificação dos resíduos sólidos encontra-se na NBR 10004 (ABNT, 1987), onde são estipulados os limites máximos para concentrações dos elementos dos ensaios ambientais. Dentre estes, com o ensaio de lixiviação, cujos procedimentos estão na NBR 10005 (ABNT, 1987), é possível verificar a periculosidade do resíduo. Caso o resíduo seja classificado como não perigoso, verifica-se através do ensaio de solubilização, conforme procedimentos da NBR 10006 (ABNT, 1987), se o resíduo é inerte ou não.

Na figura 8, é apresentado um esquema dos procedimentos necessários para caracterizar um resíduo ou um material.

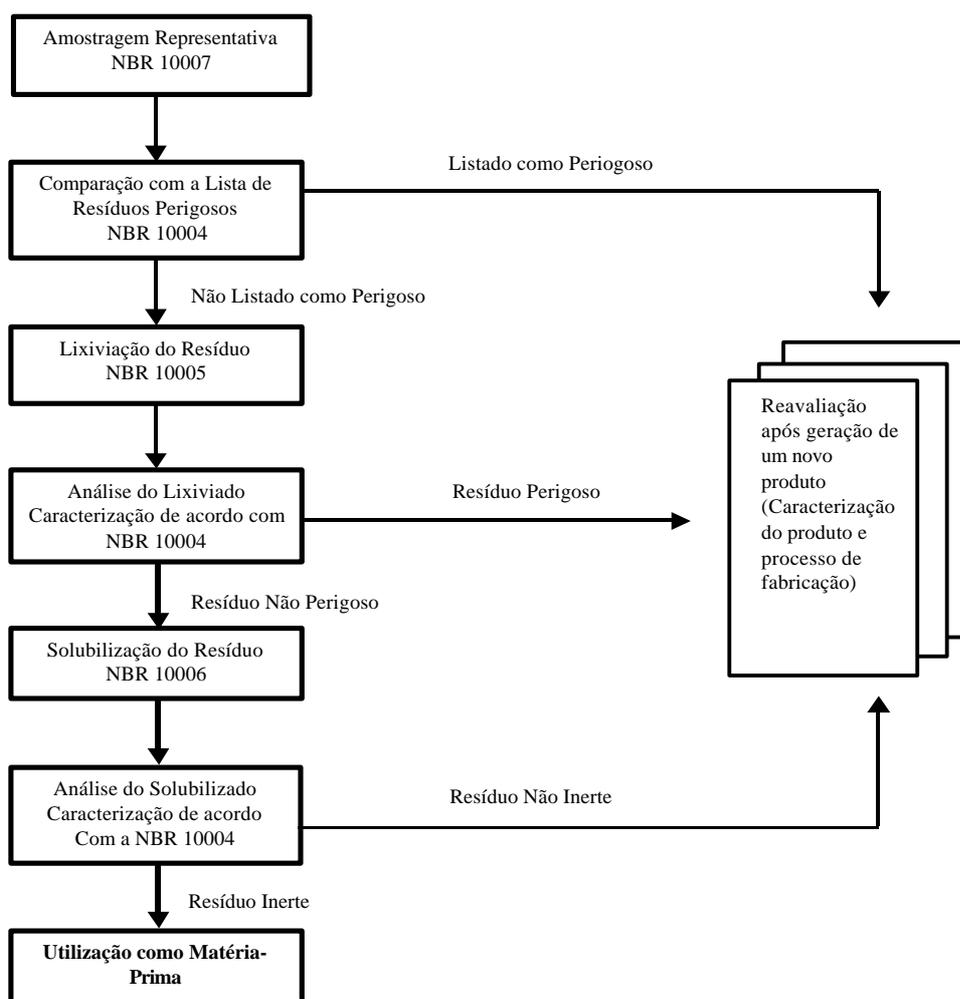


Figura 8 Etapas da caracterização da toxicidade de materiais ou resíduos de acordo com Normas Brasileiras (ROSA, 2001).

Os testes de lixiviação são aplicados para avaliar o impacto para um longo período de materiais que utilizam resíduos em sua composição, bem como o próprio resíduo. Este teste proporciona dados sobre a quantidade de contaminantes que são (ou seriam) liberados dos materiais em certo intervalo de tempo. Em normas de testes de lixiviação, o material é imerso em água, onde o pH é controlado para a condição ácida, simulando as condições naturais. A avaliação do extrato lixiviado produz informação sobre a taxa de imobilização dos contaminantes. Além disso, estudos de curvas de lixiviação proporcionam informações sobre o mecanismo que governa a lixiviação (VRANCKEN et al., 1999).

Segundo SANTHANAM et al. (1981), o potencial para a contaminação das águas superficiais ou subterrâneas, pela disposição dos resíduos, varia com as características

apresentadas pelos mesmos, o método de sua disposição e as condições do lugar. Potencialmente, há dois caminhos pelos quais semelhante contaminação pode ocorrer:

- diretamente liberadas pelo resíduo, caso não seja armazenado corretamente; e
- lixiviação dos constituintes, que pode ser prevista envolvendo dois mecanismos:
 - ✓ lixiviação de superfície, em que a difusão e dissolução do resíduo (ou material que o contenha) são usualmente limitadas; e
 - ✓ fluxo através dos poros do resíduo (ou material que o contenha), no caso de a camada da massa permeável ser limitada.

Os estudos com PAE realizados por HECK e WEBER (2000) explicam que a lixiviação depende das características e propriedades da água (pH, quantidade de oxigênio dissolvido, presença de outros cátions e ânions dissolvidos); do PAE (morfologia, tamanho e distribuição granulométrica dos grãos, tipos de minerais e outras substâncias que o constituem); dos compostos solúveis e íons na solução aquosa (produto de solubilidade, coeficiente de atividade, grau de interação entre os diferentes íons). Outros fatores, relacionados, por exemplo, com os fenômenos de transporte ou com o grau de agitação do sistema poeira-água, certamente têm, também, um papel importante no processo de lixiviação e definirão, basicamente, quais serão os elementos e em que nível eles serão dissolvidos.

Com o objetivo de encapsular o PAE, PEREIRA et al. (2001) utilizaram cimento Portland, cinza volante e cal para a confecção de pastas. O resíduo continha materiais pesados perigosos como Pb, Cr, Cd e Zn. O ensaio de lixiviação seguiu os procedimentos da TCLP¹⁶ (EPA, 1990), cujos resultados das concentrações ficaram abaixo das máximas permitidas. Isto mostrou que pastas com cinza volante, cimento Portland e cal encapsularam os metais contidos no resíduo.

No que diz respeito à avaliação das características dos produtos S/S contendo metais pesados, utilizando como ligantes o cimento e materiais pozolânicos entre outros, foram realizadas diferentes pesquisas em laboratórios do mundo.

Em um desses estudos, HAMILTON e SAMMES (1999) adicionaram em pastas distintas de cimento Portland, nas mesmas proporções, teores de ZnO e PbO. Verificaram,

¹⁶ Toxicity Characteristic Leaching Procedure – Procedimento de lixiviação característico de toxicidade.

nos extratos lixiviados, que concentrações de zinco foram inferiores às concentrações de chumbo, mostrando que a matriz cimentante proporcionou melhor encapsulamento para o zinco do que para o chumbo. Conforme MALONE et al.¹⁷, citados por VEMPATI et al. (1995), o ambiente alcalino de materiais cimentantes na presença de compostos ricos em cálcio (como CaO, CaCO₃, CaSO₄ e Ca(OH)₂) proporcionam, nos metais pesados, a formação de metais insolúveis de baixa solubilidade. Estes, conforme TAMÁS et al. (1992), não são considerados perigosos para o meio ambiente. Este comportamento foi verificado por VEMPATI et al. (1995), quando estes adicionaram o zinco sob a forma de ZnO₂²⁻ e HZnO₂⁻, formando compostos com Ca⁺².

Da mesma forma, WANG e VIPULANANDAN (2000) verificaram, com difração de raios-x, que, quando foi adicionado Cr (VI) em pastas de cimento Portland, houve a formação do complexo cromato de cálcio (CaCrO₄) com baixa solubilidade.

GLASSER (1997) e COHEN et al. (1997) sugeriram que o Cr(III) é melhor encapsulado no ambiente cimentante do que o Cr(VI), pois pode ser precipitado em solução alcalina nos poros como um hidróxido insolúvel ou ser incorporado dentro dos produtos de cimento. De acordo estão MOLLAH et al. (1992), pois, em análises de EDS e de FTIR¹⁸ em pastas de cimento com adição de cromo, observaram a dispersão do metal abaixo da superfície da matriz do cimento e interações químicas com o C-S-H. Sugerem que há a possibilidade de o Si (IV) ser substituído por Cr (III) na estrutura do C-S-H.

Por outro lado, GLASSER (1997) e COHEN et al. (1997) também verificaram que o Cr (VI) ficou solúvel na água de poros. Houve um aumento nas concentrações de cromo no extrato lixiviado para um tempo maior de cura das pastas de cimento. MURAT et al. (1996) observaram o mesmo comportamento em suas pastas de cimento com adição de Cr, apontando o metal como causa da diminuição da resistência próximo aos 28 dias. Para TAMÁS et al. (1992), cromatos e dicromatos comportaram-se diferentemente do níquel e do cádmio (que foram transformados em hidróxidos insolúveis na matriz do cimento), pois o cromo foi afetado pela presença de gesso ou produtos de hidratação com clínquer de aluminato. Foram constatadas que eram possíveis trocas de valência do cromo devido à oxidação ou redução.

Já o trabalho de PERA et al. (1997) consistiu em analisar diferentes aglomerantes e avaliar qual deles apresentava melhor desempenho em relação ao encapsulamento do Cr

¹⁷ MALONE, P.G.; MAY, J.H. Use of lime in the desing of landfills for waste disposal. In ASTM STP 931, Gutschick, K. A. (ed), p. 42, American Society for Testing, Philadelphia, PA (1987).

¹⁸ Espectroscopia Infravermelha da Transformada de Fourier (FTIR).

(VI), que foi adicionado às pastas na forma de dicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com ensaio de lixiviação. Os resultados deste ensaio e a eficiência de cada pasta podem ser observados na tabela 30.

Tabela 30 Resultados dos testes de lixiviação e de eficiência do encapsulamento do elemento Cr (VI), em pastas com diferentes aglomerantes.

Pasta	Ligantes (%)				Cr (VI) concentração (mg/kg)			Eficiência do aglomerante (%)
	CPC	CV	Mc	EGAF	16 hs	32hs	48 hs	
1	100	0	0	0	3	6	9	99,67
2	80	20	0	0	34	49	62	97,66
3	80	0	20	0	13	21	30	98,95
4	20	0	0	80	5	10	15	99,44
5	50	25	0	25	16	26	37	98,62
6	25	0	0	75	7	14	21	99,15

CPC- cimento Portland comum; CV- cinza volante; Mc- metacaulim;
EGAF- escória granulada de alto forno.
Fonte: PERA et al., 1997

Na análise dos resultados da tabela 30, PERA et al. (1997) avaliaram que o aglomerante mais eficiente foi para a pasta 1 e que a presença de cinza volante ou metacaulim não foi tão favorável para a fixação do cromato. Já para as pastas com EGAF, em geral o desempenho foi bom.

Conforme a EPA (1997), enquanto o cromo está na sua forma hexavalente, possui características suficientes para merecer uma regulamentação que o classifique como resíduo perigoso, ao passo que o cromo trivalente não.

MURAT et al. (1996) verificaram que pastas com cimento Aluminoso obtiveram bom desempenho para reter chumbo sem afetar prejudicialmente suas propriedades.

O mesmo tipo de cimento foi utilizado por TUMIDAJSKI e THOMSON (1995), que verificaram que o cádmio foi retido na matriz hidratada do cimento, inicialmente na forma de CdO e mais tarde como $\text{Cd}(\text{OH})_2$.

HERRERA et al.¹⁹, citados por TUMIDAJSKI et al. (1995), também imobilizaram o cádmio na matriz do cimento Portland, em que aparentemente ocorreu a substituição do Ca^{2+} pelo Cd^{2+} na fase hidratada do cimento através do mecanismo de difusão e/ou dissolução.

¹⁹ HERRERA E., TITTLEBAUM M., CARTLEDGE F.; EATON H. Evaluation of the Leaching Properties of Solidified Heavy Metal Wastes, J. Environ. Sci. Health, A27 (4), 983-998 (1992).

COCKE et al. (1992) e LI et al. (2001) explicam que o comportamento dos metais contidos na matriz cimentante no ensaio de lixiviação é controlado principalmente pela barreira de natureza alcalina da matriz. O decréscimo da alcalinidade causado pelo ataque ácido aumenta a solubilidade dos cátions perigosos assim como diminui a integridade física e química da matriz do cimento, e há um aumento da concentração de metais pesados no extrato lixiviado das amostras. A lixiviação dos metais pesados dos materiais moldados através da tecnologia de S/S pode ser considerada como dependente do pH e da solubilidade dos hidróxidos metálicos.

Segundo VEMPATI et al. (1995), com a manipulação do ambiente químico, é possível sintetizar novas classes de minerais que possam ser usados para imobilizar e/ou bloquear substâncias tóxicas. Em alguns casos, há a necessidade de desenvolver uma nova classe de cimento especialmente para este propósito.

CHAN et al. (2000) constataram que pastas com cimento Portland com carbono ativado reduziram a lixiviação de metais pesados, como zinco e chumbo, em até 24% quando comparados à pasta de cimento Portland comum, permanecendo abaixo dos limites estabelecidos pela EPA (1990) para o TCLP.

4 FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

Conforme FRASSON JUNIOR (2000), cada tipo de concreto possui características bem próprias e diversificadas, mas podem ser classificados dentro de dois grandes grupos, quais sejam: os concretos plásticos e os concretos “secos”²⁰.

Dentre os concretos plásticos, pode-se destacar o concreto convencional, utilizado em obras de concreto armado, o concreto fluido, utilizado, por exemplo, em peças pré-moldadas que necessitam que a mistura seja auto-adensável e o concreto graute, utilizado na concretagem dos vazados de blocos em alvenarias estruturais. Dentre os concretos “secos”, encontra-se o concreto projetado, utilizado em contenção de encostas e em túneis, o concreto utilizado na confecção de blocos, tubos, pavimentos e o concreto compactado a rolo, utilizado na construção de barragens (FRASSON JUNIOR, 2000).

Os concretos “secos” são assim chamados porque sua mistura possui características de concreto levemente umedecido. Isto faz com que estes concretos possuam abatimento de tronco de cone²¹ zero, e há a necessidade de que a retirada de ar aprisionado seja feita por máquinas que conferem compacidade às misturas. A exemplo, têm-se as máquinas de projeção dos concretos projetados via seca, o rolo compactador de concretos compactados a rolo e as máquinas vibro-prensas para produzir os blocos de concreto (FRASSON JUNIOR, 2000).

Para a fabricação de blocos de concreto, normalmente utiliza-se cimento Portland, agregado miúdo (areia natural e/ou artificial) e agregado graúdo (pedrisco²²). O cimento é utilizado a granel ou em sacos. No primeiro caso, são estocados em silos industriais dimensionados de acordo com a produtividade da usina. Já o emprego em sacos ocorre normalmente quando a dosagem dos agregados é feita em volume (MEDEIROS et al. 1994).

Os agregados são estocados na maioria das vezes a céu aberto. Nestas condições, ficam sujeitos a sensíveis variações de umidade, que prejudicam a moldagem adequada dos blocos. Para solucionar este problema, algumas usinas possuem medidores automáticos de umidade no interior dos misturadores que permitem a correção rápida desta variável (MEDEIROS et al., 1994).

²⁰ Concretos com abatimento zero.

²¹ Conforme NBR 7223 (ABNT, 1992) prescreve o método pelo qual se determina a consistência de concretos pelo abatimento de cone.

²² Também conhecido por brita zero.

Apesar de existirem metodologias de dosagens para concretos secos, elas possuem algumas imprecisões por não levarem em consideração uma série de fatores intervenientes no processo de produção e conceitos fundamentais sobre os concretos “secos”. Desta forma, normalmente os traços proporcionados não satisfazem as resistências pré-estabelecidas ou características específicas, como a textura, absorção e resistência dos blocos, fazendo com que sejam necessários ajustes na fábrica, executados de forma empírica, na base de tentativas para o alcance das mesmas. Para os concretos “secos” utilizados na produção de blocos, a umidade alcançada nas misturas é fundamental para que possa ser utilizada para a finalidade requerida (FRASSON JUNIOR, 2000).

A quantidade de água de cada mistura experimental deve ser a maior possível, até um limite de umidade ideal da mistura, suficiente para que os blocos não se desagreguem, porém não tão grande que faça com que os mesmos tenham dificuldade de desforma por aderência da mistura aos moldes, ou perda do formato adequado. Normalmente, a quantidade de água ideal ou umidade ótima é a que permite moldar-se uma pelota de concreto nas palmas das mãos, sem que esta se esboroe (falta de água) ou que suje excessivamente as mãos (excesso de água). A determinação da umidade ótima também é conhecida como “ponto de pelota” (TANGO, 1994).

Para RODRIGUES (1995), o teor de água do concreto, situado entre 6% a 8%, desempenha um importante papel no aparecimento de vazios nas peças, prejudiciais ao seu desempenho mecânico. A determinação do teor ótimo de água deve ser feita com o próprio equipamento de moldagem, fabricando-se peças com teores crescentes de umidade: quanto maior, mais compactas e mais resistentes serão as peças, até um determinado limite. Portanto, deve-se colocar a maior quantidade de água possível, desde que após a moldagem dos blocos não percam a forma original ou fixem-se nas sapatas de compactação ou no próprio molde. Conforme FRASSON JUNIOR (2000), a produção de blocos de concreto envolve uma tecnologia muito peculiar. Diferentemente de um concreto convencional, o concreto para a produção de blocos de concreto não segue à risca a “Lei de Abrams”, com a sua conhecida regra da “relação água/cimento $\times f_c$ ”. Portanto, neste caso, não é válida a recomendação de reduzir a quantidade de água na mistura para melhorar a resistência mecânica. Ao contrário, via de regra, dentro de um certo limite, quanto maior é o teor de água adicionado à mistura, maior será a resistência alcançada. Isto ocorre porque a água dosada confere à mistura uma plasticidade que facilita a prensagem do material nas formas da máquina. Existe uma umidade ótima na qual as misturas conseguem obter uma melhor compactação, bem como ocorre na compactação de solos, por exemplo.

O concreto para blocos necessita de certas precauções na dosagem²³, levando-se em conta ser um concreto com *consistência de terra úmida* e não um concreto plástico; neste último, praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos espaços deixados pelos agregados, enquanto que no concreto para blocos existe a presença de ar em volume significativo na mistura (TANGO, 1994).

Conforme JUVAS (1991), as pequenas mudanças nas matérias-primas causam grandes modificações na trabalhabilidade²⁴ e na qualidade do produto final. Caso um concreto com abatimento zero seja compactado apropriadamente, as propriedades do produto final são excelentes. As propriedades desejadas para os concretos com abatimento zero utilizados na manufatura dos blocos de concreto são:

- boa estabilidade no estado fresco;
- resistência ideal para cada tipo de peça, em curto espaço de tempo, com uma quantidade de cimento competitiva economicamente;
- boa durabilidade e pequenas deformações no concreto endurecido.

Para RODRIGUES (1995) e FRASSON JUNIOR (2000), para alcançar a qualidade necessária para os blocos de concreto para pavimentação, é necessário unir a boa técnica de fabricação aos equipamentos adequados. A produção de peças de boa qualidade começa com a escolha adequada de cada um dos equipamentos que compõem uma pequena indústria.

Conforme RODRIGUES (1995), os equipamentos básicos necessários à produção de blocos pré-moldados de concreto são os seguintes:

Misturador – existem dois tipos: o de eixo horizontal e o de eixo vertical. O primeiro não é ideal para as misturas secas, como as utilizadas na fabricação de blocos;

Balança de agregados – traz a vantagem de propiciar uma produção de concretos de qualidade mais constante, permitindo a utilização de misturas com menores teores de cimento. Ela evita as influências negativas causadas pela umidade da areia, que são problemáticas quando a medida é feita em volume;

²³ Dosagem é entendida como o conjunto de operações para o estabelecimento do traço.

²⁴ JUVAS (1991) definiu trabalhabilidade em seu trabalho como sendo a massa específica (kg/dm^3) atingida pelo concreto. Quanto maior este valor, até um determinado limite, melhor seria o desempenho mecânico dos blocos de concreto.

Equipamentos de moldagem – são geralmente de dois tipos: os vibratórios e os vibro-compactadores. Os primeiros não são os mais indicados, uma vez que exigem, para a moldagem, misturas ricas em cimento, enquanto que os vibro-compactadores, possuindo dispositivo de compactação, além do de vibração, podem moldar peças com menores consumos de cimento. Eles produzem peças com melhor acabamento superficial, portanto de maior resistência ao desgaste.

O principal parâmetro para a dosagem dos blocos de concreto é a granulometria dos agregados a serem utilizados. Estes materiais devem ser combinados de forma a se conseguir o máximo grau de compactação possível dos blocos durante a moldagem nas vibroprensas (MEDEIROS et al., 1994).

Conforme FRASSON JUNIOR (2000), a dosagem de concretos “secos” baseia-se na formulação de uma mistura com um mínimo de vazios possíveis. Isto significa dizer que as dosagens visam alcançar maiores massas unitárias, ou seja, maior massa de material em um mesmo volume, diminuindo o volume de vazios. Esta busca por um menor volume de vazios tem por objetivo encontrar um proporcionamento entre agregados que resulte em uma mistura mais compacta por ter relação direta com a resistência à compressão.

Neste proporcionamento, segundo RODRIGUES (1995), pode ser utilizado o método do Menor Volume de Vazios, através dos procedimentos da NBR 7810. Determinada a melhor mistura pedrisco-areia, a próxima etapa é a determinação da relação Agregado/Cimento (m), que irá depender, principalmente, do equipamento de moldagem, sendo baixa quando a energia de adensamento disponível (vibração associada à compactação) for pequena, indicando alto consumo de cimento. Ao contrário, quando dispõe-se de equipamento capaz de fornecer grande energia de adensamento, esta se traduzirá em menor consumo de cimento por unidade produzida, tornando o custo unitário, relativo aos insumos, mais baixo. A melhor maneira de determinar qual a melhor relação agregado/cimento (m) é fazer testes de produção, nos quais se fabricam lotes de peças com diversos consumos de cimento. Os resultados do ensaio possibilitam determinar a melhor relação, que será função de parâmetros técnicos e econômicos. Deve-se buscar uma peça que seja, ao mesmo tempo, resistente e de preço competitivo.

Com o objetivo de proporcionar uma dosagem mais rápida e de boa confiabilidade, JUVAS (1991) apresentou um novo equipamento para testar o concreto com abatimento zero, denominado Intensive Compaction Tester (ICT), que está sendo utilizado

pela Partek Corporation's²⁵. O equipamento foi projetado especialmente para monitorar a trabalhabilidade e moldar amostras cilíndricas para avaliar a resistência à compressão. É interessante mostrar que trabalhabilidade, para o autor, é a maior massa específica obtida pela mistura, pois para o concreto com abatimento zero, a maior massa específica proporciona o menor índice de vazios e, assim, um produto com melhores qualidades.

JUVAS (1991) explica que, com o equipamento ICT, consegue-se, com uma amostra de 900g de concreto com abatimento zero, graficar a massa específica deste concreto (kg/m^3) pelo número de ciclos. Como a amostra é compactada automaticamente, isto reduz a influência humana no resultado final. O equipamento possuiu sensibilidade para pequenas mudanças no concreto com abatimento zero, como 5 litros de água / m^3 ou um aumento de 2% na quantidade de silte²⁶ contido nos agregados. Como o silte também influencia na perda da trabalhabilidade, sugere-se lavar os agregados antes de utilizá-los na mistura ou utilizar superplastificante.

Outro ensaio utilizando o equipamento ICT foi com a utilização de superplastificante em torno de 1 a 2% na dosagem de concretos com abatimento zero, melhorando claramente o efeito na trabalhabilidade. Esta também apresentou melhorias quando foi utilizado 8% de sílica ativa. Entretanto, o melhor desempenho da trabalhabilidade foi adquirido quando foi utilizado o superplastificante em conjunto com a sílica ativa (JUVAS,1991).

Após ser definido o melhor proporcionamento dos materiais, realiza-se a mistura do concreto. Segundo RODRIGUES (1995), os materiais devem ser colocados na misturadora, preferencialmente da seguinte forma:

- Todo o pedrisco e parte da água, ligando-se a misturadora por apenas alguns segundos;
- todo o cimento, misturando-o com o pedrisco, fazendo com que as partículas do agregado sejam envolvidas por uma camada de pasta de cimento;
- toda a areia e restante da água.

²⁵ Partek Corporation's Concrete laboratory at Pargas, Finland.

²⁶ Conforme NEVILLE (1997), O silte é um material entre $2\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$, reduzido a esse tamanho por processos de intemperismo; assim o silte pode ser encontrado em agregados extraídos de jazidas naturais. Devido a grande área superficial, aumenta a demanda de água necessária para molhar todas as partículas na mistura.

Após o término da colocação dos materiais, a misturadora deverá permanecer ligada até que se obtenha um concreto homogêneo, caracterizado visualmente pela uniformidade de aspecto (RODRIGUES, 1995).

Realizada a mistura, o material é conduzido à cuba de alimentação da vibroprensa. Esta máquina é de fundamental importância nas características das peças pré-moldadas de concreto, pois possui a propriedade de imprimir elevados graus de compactação aos concretos “secos”, e interfere significativamente nas resistências à compressão, absorção e textura do material (FRASSON JÚNIOR, 2000).

Após a confecção dos blocos, através de uma esteira rolante, são recolhidos para prateleiras metálicas e transportados para o local de cura. Os tipos de cura comumente empregados para o caso dos blocos de concreto são a cura natural e a cura a vapor (MEDEIROS et al., 1994).

O ciclo natural consiste na cura em condições ambiente, mantendo-se constante a umidade do estoque através de aspersão de água por um período adequado, compreendido normalmente entre 3 e 7 dias (MEDEIROS et al., 1994).

O ciclo de cura a vapor, segundo MANSORY INTERNATIONAL²⁷, citado por MEDEIROS et al.(1994), depende do tipo de bloco e das instalações do sistema utilizado. Para uma cura de 16 horas, cerca de duas horas de efetiva aplicação de vapor, produzido por gerador ou caldeira, seria suficiente. A temperatura do ambiente das câmaras deve ser elevada entre 65 e 82° C.

²⁷ MASONRY INTERNATIONAL. A review of curing systems used in the concrete block industry. London, 1987.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com vistas a estudar a influência da adição do PAE nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos blocos de concreto para pavimentação.

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para confecção dos blocos de pavimentação foram PAE, areia fina, areia média, pedrisco, cimento CP II –Z classe 32 e água potável.

5.1.1 Pó de aciaria elétrica (PAE)

O PAE empregado nos experimentos foi gerado em uma usina semi-integrada, na produção de aços, e coletado com filtros de manga, localizados na saída do forno elétrico a arco (FEA).

A amostra total do PAE empregada foi obtida através da mistura e homogeneização de 11 amostras de 28kg do resíduo, coletadas em um período de dois meses, totalizando 308 kg.

5.1.1.1 Características químicas e físicas

A composição química do PAE, determinada pelas técnicas de espectrometria de absorção atômica, espectrometria de plasma (ICP), combustão, espectrometria de UV-visível e volumetria, encontra-se na tabela 31. A caracterização química e microestrutural do PAE foi realizada por BREHM_a et al. (2001), como parte de sua tese de doutorado. O PAE utilizado em ambas as pesquisas foi o mesmo.

Tabela 31 Composição química do PAE.

Composição química do PAE	
Elemento	(%)
Fe	42,00
Zn	13,30
Ca	4,28
Mn	1,90
Mg	1,61
Pb	1,34
Si	1,29
C	1,10
Cr	1,05
K	0,97
Na	0,84
S	0,32
Cu	0,24
Ni	0,19
P	0,17
Cd	0,11
Mo	0,07
Al	0,29
Co	0,05

PAE- pó de aciaria elétrica
 Fonte: BREHM_a et al. (2001)

O total elementar dos elementos presentes na amostra do PAE soma 71,12%. Segundo BREHM_a et al.(2001), os resultados analíticos foram mantidos na forma elementar e não na forma de óxidos como usualmente são fornecidos, pois somente com esta técnica não é possível afirmar sob que forma estes elementos estão combinados. Ao transformar estes dados elementares nos óxidos mais estáveis, o fechamento da análise passa dos 100%, o que permite concluir que não é desta forma que as fases se apresentam. Esses resultados analíticos foram usados como ponto de partida para as análises de EDS, acoplado ao MEV, e de difração de raios-x. Entretanto, a análise química tem mostrado que Fe e Zn são os elementos majoritários presentes no pó.

Para a determinação da massa específica do PAE, foram utilizados os procedimentos da NBR 6474 (ABNT, 1984). O resultado encontrado foi de 4,44 kg/dm³.

A distribuição granulométrica do PAE foi realizada com um granulômetro de difração a laser, marca Cilas, modelo 1064, no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia - UFRGS. O valor médio do diâmetro do pó é de 0,83 µm, sendo que 90% das partículas possuem tamanho inferior a 3,60 µm. Os resultados são ilustrados na figura 9.

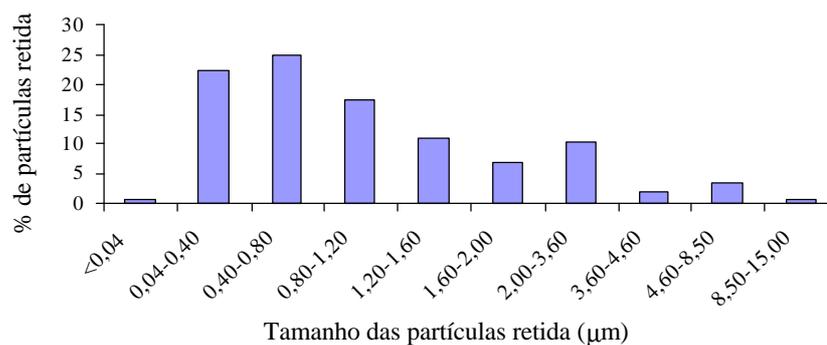


Figura 9 Distribuição granulométrica da amostra do PAE.

5.1.1.2 Caracterização mineralógica, morfológica e ambiental do PAE

A caracterização mineralógica foi realizada com um aparelho de Difração de Raios-X, marca Siemens, modelo Diffraktomer D5000, no laboratório de Análise de Materiais do Instituto de Física da UFRGS. Na figura 10, é mostrado um difratograma de raios-x representativo das amostras do PAE. Observa-se que há uma grande incidência de picos, o que indica que a estrutura do PAE é, predominantemente, cristalina. Nota-se a presença de diversas fases sólidas com destaque para os óxidos de zinco e de ferro.

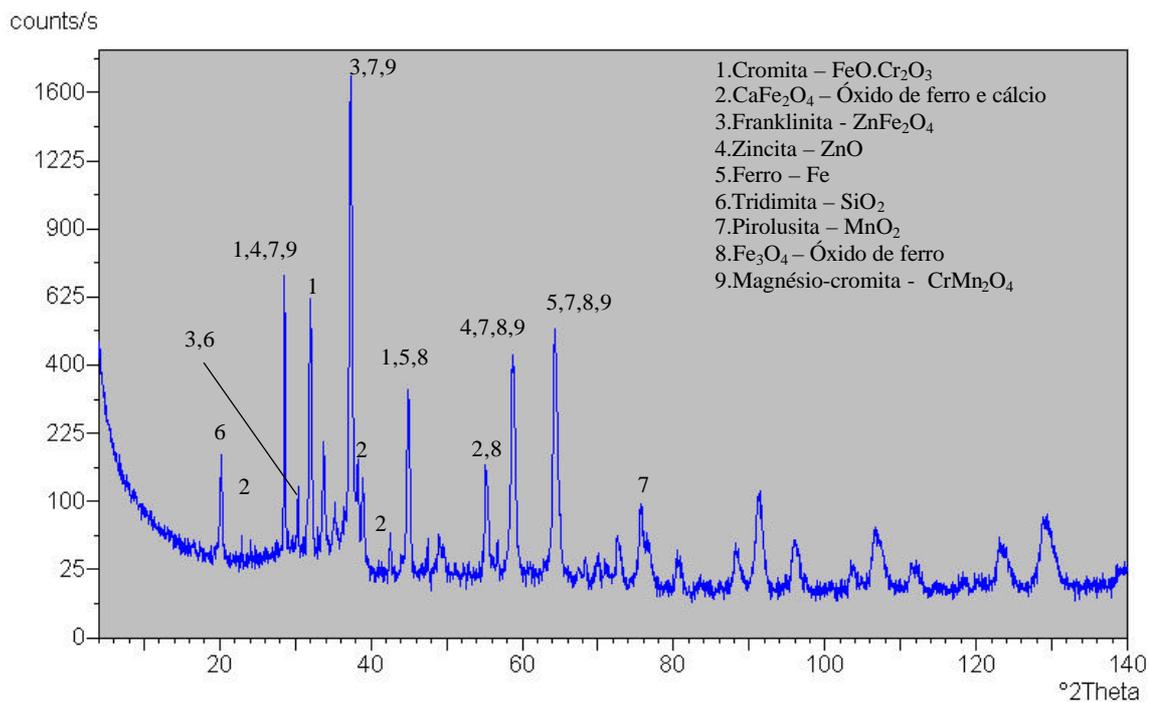


Figura 10 Difratoograma da amostra do PAE.

Fonte: BREHM_a (2001).

Para avaliar a morfologia das partículas que compõem o PAE foram realizadas análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons secundários, no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), da Escola de Engenharia da UFRGS. Na figura 11a e 11b são mostradas duas imagens do PAE. Como pode ser verificado, os grãos possuem a forma esférica e, aparentemente, superfície lisa.

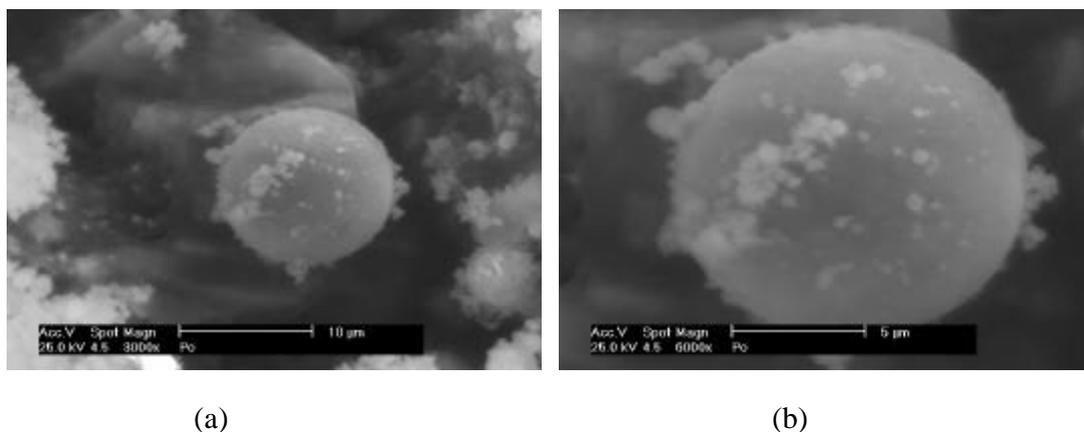


Figura 11 Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários da amostra do PAE (a) aumento de 3000 vezes, (b) aumento de 6000 vezes.

Para a caracterização ambiental, realizou-se o ensaio de lixiviação, conforme NBR 10005 (ABNT, 1987). O cádmio (7,50 mg/L) e o chumbo (13,0 mg/L) ultrapassaram as concentrações máximas permitidas pela NBR 10004 (ABNT, 1987), conforme indicado na tabela 32. Com base nestes resultados, o PAE é classificado como resíduo Classe I – perigoso. As análises dos extratos foram realizadas no laboratório de análises químicas da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

Tabela 32 Resultados do ensaio de lixiviação para amostras do PAE.

Elemento	Quantidade	Limite (NBR 10004, ABNT 1987)
F ⁻ mg/L*	8,00	150,00
Cd mg/L*	7,50	0,50
Pb mg/L*	13,00	5,00
Cr mg/L*	<0,02	5,00
Cr ⁺⁶ mg/L	0,01	NN
Ba mg/L	<1,00	100,00
Ag mg/L	<0,01	5,00
Hg -µg/L*	<0,0001	100,00

*Substância considerada tóxica.

NN- não normalizado.

5.1.2 Cimento

O cimento empregado foi o cimento Portland Composto (CP II-Z), classe 32. A utilização deste cimento foi decorrente do fato de ser de uso comum pela empresa onde foram confeccionados os blocos de concreto para pavimentação. As características deste cimento encontram-se na tabela 33.

Tabela 33 Composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado no trabalho.

Composição química	Cimento CP II-Z classe 32*	Limites NBR 11578/91
SiO ₂ (%)	36,38	-
Al ₂ O ₃ (%)	8,53	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3,05	-
CaO (%)	50,04	-
MgO (%)	4,30	≤6,50
K ₂ O (%)	1,05	-
Na ₂ O (%)	0,13	-
SO ₃ (%)	3,00	≤4,00
Perda ao fogo (%)	2,99	≤6,50
Resíduo insolúvel (%)	14,61	≤16,00
Propriedades Físicas		
Massa Específica (kg/dm ³)	2,94	-
Resíduo na PENEIRA 200 (%)	0,5	≤12
Resíduo na PENEIRA 325 (%)	4,1	-
Finura BLAINE (cm ² /g)	3806	≥2600
Água de consistência (%)	30,5	-
Início de pega hh:mm	03:44	≥1,0
Fim de pega hh:mm	05:12	≤10,0
Propriedades Mecânicas		
fc 1 dia (MPa)	15,3	-
fc 3 dias (MPa)	27,0	≥10,0
fc 7 dias (MPa)	32,6	≥20,0
fc 28 dias (MPa)	40,5	≥32,0

*Dados fornecidos pelo fabricante.

5.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa, procedente do Rio Jacuí/RS, cuja distribuição granulométrica e as características físicas estão apresentadas na tabela 34.

Tabela 34 Distribuição granulométrica e características físicas do agregado miúdo.

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada	
	Areia Fina	Areia Média
4,8	2	2
2,4	9	9
1,2	20	23
0,6	40	50
0,3	74	84
0,15	97	98
<0,15	100	100
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8	4,8
Módulo de Finura	2,42	2,66
Massa específica (g/cm ³)	2,6	2,6

Dados fornecidos pela empresa.

5.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de origem basáltica, classificado de acordo com sua granulometria como sendo Brita 0 (Pedrisco), com dimensão máxima característica de 9,5 mm (NBR 7211, ABNT 1983). A distribuição granulométrica, bem como suas características físicas, estão apresentadas na tabela 35.

Tabela 35 Distribuição granulométrica e características físicas do agregado graúdo.

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
9,5	0
6,3	45
4,8	85
2,4	99
1,2	99
<0,6	100
Dimensão Máxima Característica (mm)	9,5
Módulo de Finura	5,83
Massa específica (g/cm ³)	3,1*

Dados fornecidos pela empresa.

* este valor foi confirmado em um 2º ensaio realizado LABORATÓRIO DO NORIE – UFRGS por apresentar-se superior ao valor encontrado normalmente para agregados utilizados no RS.

5.1.5 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local.

5.2 METODOLOGIA

O programa experimental foi organizado com vistas a avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade de blocos de concreto para pavimentação (8 cm de altura) com adição do PAE.

Ensaios complementares em pastas de cimento foram realizados visando a contribuir para o entendimento do comportamento do PAE na matriz cimentante.

Os teores utilizados do PAE foram de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento. Estes teores foram escolhidos com base na revisão bibliográfica, na qual as proporções utilizadas do resíduo foram, em substituição ao cimento, de 1% (AL-ZAID et al., 1997), até 40% (BARBOSA, 1993). Os teores adotados neste trabalho foram na tentativa de identificar os limites inferior e superior das misturas, pois considerou-se 40% um valor alto para ser adotado, uma vez que o PAE apresenta estrutura cristalina, e 1%, baixo, visto que a massa específica do resíduo é elevada e a adição do mesmo foi feita em massa. Foram também confeccionados blocos e pastas sem adição do PAE, como referência (0%).

5.2.1 Descrição de ensaios e processos de moldagens utilizando PAE

Moldaram-se pastas contendo os teores de PAE já descritos na metodologia. Nestas pastas, foram determinados: tempos de pega, cujo ensaio preliminar é a determinação da água da pasta de consistência normal; calor de hidratação ao longo do tempo; e caracterização mineralógica e microestrutural.

Já os blocos de concreto foram avaliados do ponto de vista mecânico, de durabilidade e ambiental, além de determinadas suas propriedades físicas.

Na figura 12, é esquematizado um fluxograma dos ensaios realizados no programa experimental.

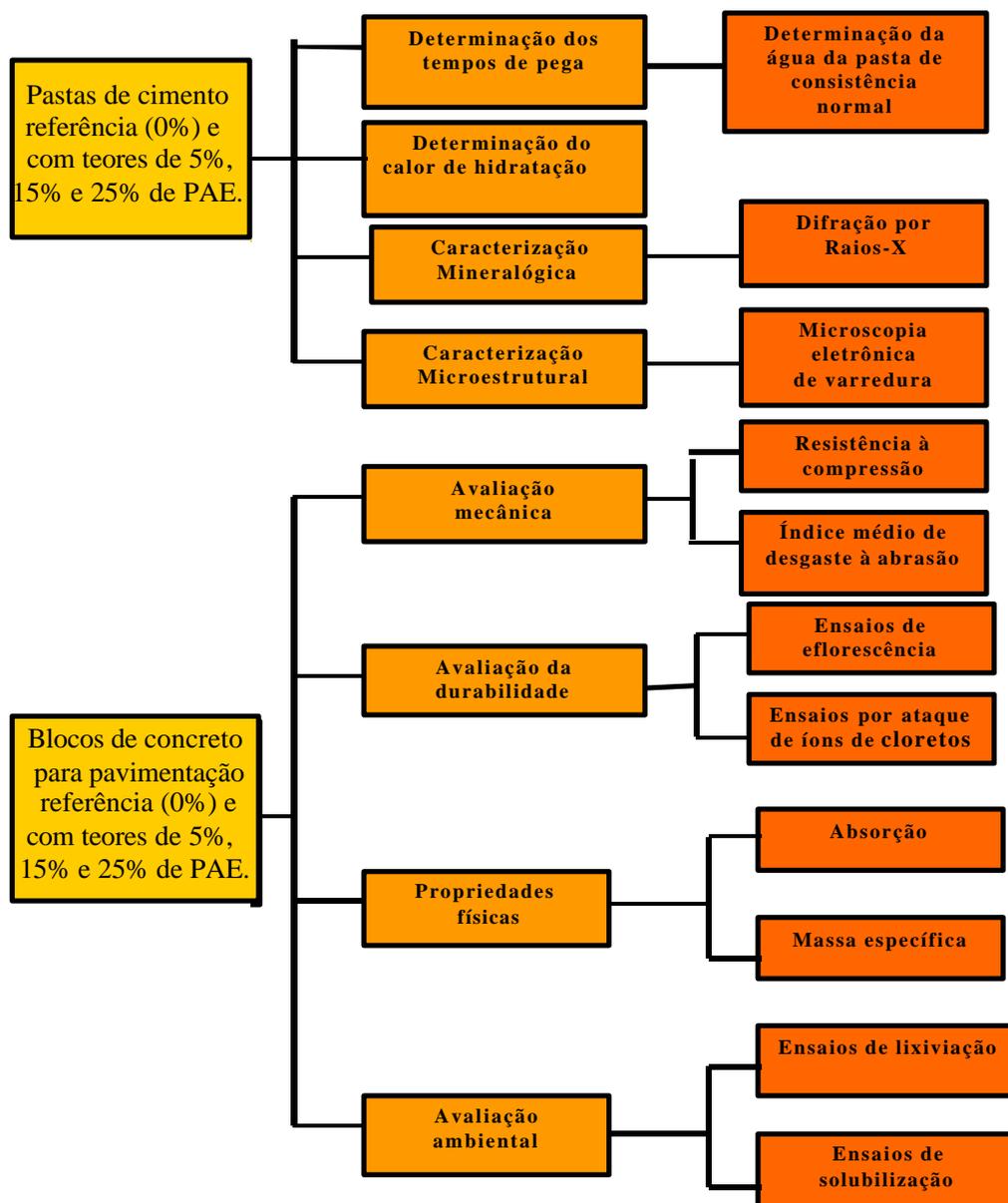


Figura 12 Fluxograma dos ensaios realizados no programa experimental.

5.2.1.1 Ensaios em laboratório para pastas com diferentes adições do PAE

Para avaliação da influência do PAE nos tempos de pega de pastas de cimento, fez-se necessário, em primeiro lugar, determinar a água da pasta de consistência normal, conforme procedimentos da NBR 11580 (ABNT, 1991), para, após, determinar-se os tempos de pega, conforme procedimentos da NBR 11581 (ABNT, 1991).

O calor de hidratação de pastas de cimento foi determinado através da moldagem de pastas com 1 kg de cimento cada uma, com relação água/cimento fixa de 0,31 (valor determinado na água de consistência normal para o cimento, tabela 37 p. 74), esta pasta como referência e adicionados teores de PAE de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento, sendo, após, devidamente homogeneizadas. As pastas foram acondicionadas em frascos metálicos, e foram introduzidos, em cada pasta, um termo-resistor PT 100 (platina com resistência de 100Ω a 0°C). Após, os frascos foram colocados em garrafas semi-adiabáticas e hermeticamente fechadas. Cada termo-resistor estava conectado a um sistema de aquisição de dados (SAD), enviando sinais de tensão ao longo do tempo. Estes sinais, com uma conversão adequada, permitem que o programa determine a grandeza de interesse, que, no caso, é a temperatura ($^\circ\text{C}$) (LMM, 2000).

Procurando minimizar a influência do ambiente, as garrafas foram colocadas em sala climatizada com temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 2$ e umidade de $70\% \pm 5$. O tempo de duração do ensaio foi de 96 horas. O SAD, por possuir 4 canais independentes, possibilitou a realização do ensaio das pastas com os diferentes teores do PAE, simultaneamente.

Para a caracterização mineralógica e microestrutural, foram moldadas pastas de cimento adicionadas com os mesmos teores do PAE utilizados para a determinação dos tempos de pega, utilizando para cada uma a relação água/cimento determinada no ensaio da água de consistência normal, conforme tabela 37 (p. 74). Estas pastas foram colocadas em câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$, até as idades definidas para as caracterizações (7 e 28 dias). Para a caracterização mineralógica, as amostras foram moídas em graal de ágata para que os grãos estivessem em uma granulometria abaixo da peneira #200 e analisadas com o aparelho de difração de raios-x marca Siemens, modelo Difraktomer D500, no laboratório de Análise de Materiais - Instituto de Física da UFRGS. As análises de difração foram realizadas com o auxílio do software X-Pert da Philips. Para a caracterização microestrutural, as amostras foram metalizadas com carbono e analisadas no microscópio eletrônico de varredura acoplado com sonda EDS – elétrons

secundários, no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), na Escola de Engenharia da UFRGS.

A metalização das amostras foi feita com carbono e não com ouro, para a realização de análises de EDS, pois, segundo GOLDSTEIN et al. (1984), a camada de carbono tem menos absorção de fótons de raios-x do elemento excitado do que em relação à metalização de ouro. Com isso, tem-se uma análise mais precisa.

5.2.1.2 Ensaios em laboratório para blocos de concreto com diferentes teores do PAE

A resistência característica à compressão dos blocos de pavimentação foi determinada seguindo os procedimentos da NBR 9780 (ABNT, 1987) e da NBR 9781 (ABNT, 1987). Para a realização deste ensaio, as peças foram saturadas em água e as superfícies de carregamentos capeadas com argamassa de enxofre. Para cada teor do PAE utilizado nos blocos de concreto, foram ensaiados 6 corpos-de-prova, os quais foram rompidos em uma máquina marca Solo Teste, digital com capacidade para 100 t, equipada com dois pratos de aço, onde estes realizam a transmissão do carregamento à peça a ser ensaiada.

Conforme NBR 9780 (ABNT, 1987), a resistência à compressão (em MPa) da peça é obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N) pela área de carregamento (em mm²), multiplicando-se o resultado pelo fator “p”, função da altura da peça. Neste trabalho, devido ao fato de as peças possuírem altura de 8 cm, o fator adotado foi p = 1,00.

O cálculo do valor característico da resistência à compressão, conforme a NBR 9781 (ABNT, 1987), é realizado através da equação 13:

$$f_{pk} = f_p - t * s, \text{ onde:} \quad (13)$$

f_{pk} = resistência característica à compressão, em MPa;

f_p = resistência média das peças ensaiadas de acordo com a NBR 9780, em MPa;

s = desvio padrão da amostra $\sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}}$, MPa;

f_{pi} = resistência individual das peças ensaiadas de acordo com a NBR 9780, em MPa;

n = número de peças da amostra (nesse trabalho em número de 6 peças);

t = coeficiente de Student, que varia em função do número de peças ensaiadas.

O coeficiente de Student adotado neste trabalho, conforme NBR 9781 (ABNT, 1987), foi de 0,920, pois foram utilizadas 6 peças em todos os ensaios de resistência à compressão.

Os valores da resistência característica à compressão para os blocos de concreto de pavimentação, com diferentes teores do PAE, na primeira etapa foram determinadas nas idades de 7, 14, 21, 28, 91 e 182 dias. Na segunda etapa, estes valores foram determinados nas idades de 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 91, 182 e 364 dias.

O resultado da resistência média obtido para um teor de PAE em uma dada idade é o resultado de seis corpos-de-prova, calculado segundo o procedimento da NBR 9781 (ABNT, 1987).

O ensaio de desgaste à abrasão foi realizado pela CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia, de acordo com o “Método CIENTEC de Desgaste por Abrasão” que simula um percurso de 500 metros percorridos pelo corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo de carborundo. A amostra ensaiada neste teste foi obtida do corte do bloco de concreto com serra circular diamantada. Para cada teor do PAE utilizado nos blocos, foram ensaiadas duas peças. O resultado é expresso em termos de índice de desgaste, que corresponde à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos de cada corpo-de-prova.

A determinação da absorção e da massa específica dos blocos de concreto seguiram os procedimentos preconizados na NBR 9778 (ABNT, 1987).

Do ponto de vista da durabilidade, foram realizados ensaios de eflorescência e ataque por íons cloretos.

A eflorescência é um fenômeno que ocorre devido à absorção de água pelos materiais, que, deslocando-se por capilaridade no seu interior, pode conduzir consigo cristais contidos na estrutura do material, e quando atingem a superfície com a evaporação da água eles ficam depositados. Como o PAE apresenta diferentes óxidos em sua composição, a utilização deste ensaio foi para verificar se haveria ou não o aparecimento de cristais na superfície dos blocos. Este ensaio foi realizado conforme a norma ASTM 67 – 97. Foram

realizados ensaios de eflorescência para os blocos de concreto com diferentes teores do PAE nas idades de 7 e 28 dias.

Foi realizado o ensaio de ataque por íons cloretos para verificar o desempenho dos blocos de concreto para pavimentação frente à ação destes íons, devido ao grande percentual de óxidos de ferro existentes no PAE. Os blocos de concreto foram submetidos a ciclos de imersão em solução de cloreto de sódio e secagem. Cada ciclo foi composto de 7 dias. No primeiro dia, os corpos-de-prova eram imersos em solução de cloreto a 3,5%, e nos seis restantes, os mesmos eram submetidos a períodos alternados de secagem realizados com auxílio de um painel de lâmpadas de 3000W, no qual 6 horas permaneciam aquecendo sob a exposição das lâmpadas e 6 horas à temperatura ambiente. Ao fim de cada ciclo, antes da sua imersão em solução de cloretos, os corpos-de-prova eram pesados para monitorar o ganho/perda de massa que porventura viriam a ocorrer. Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio após sete dias de cura ambiente. A duração deste ensaio foi de 180 dias. Após este período, os blocos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

Para a caracterização ambiental, foram realizados ensaios de lixiviação e de solubilização seguindo os procedimentos descritos na NBR 10005 (ABNT, 1987) e da NBR 10006 (ABNT, 1987), respectivamente. Estes ensaios foram realizados com blocos de concreto com diferentes teores de PAE com idades de 7, 14, 21 e 28 dias. As análises químicas dos extratos foram realizadas no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, com auxílio de um Espectrofotômetro de absorção atômica, marca Perkin Elmer, modelo AANALYST 100. Este equipamento possui limites de detecção para os elementos analisados: Mn, Zn e Cd de $0,01\text{mgL}^{-1}$; Fe de $0,03\text{mgL}^{-1}$; Cr e CN de $0,02\text{mgL}^{-1}$; Pb de $0,05\text{mgL}^{-1}$; e Hg de $0,2\text{µgL}^{-1}$.

Na figura 13, observa-se o ensaio de lixiviação, após preparo das amostras dos blocos conforme NBR 10005 (ABNT, 1987), em que a amostra é colocada em agitador mecânico.



Figura 13 Ensaio de Lixiviação.

5.2.1.3 Análise estatística utilizada

A influência da adição do PAE em blocos de concreto foi avaliada a partir da determinação de propriedades no estado endurecido.

Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite comparar grupos de observações, através da comparação da variabilidade das médias entre grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO, 1987). A análise foi realizada para os ensaios de resistência à compressão, resistência à abrasão, absorção e massa específica, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, bem como a possível existência de interações entre estas variáveis. Através de um teste de comparação entre valores calculados (F calculado) e os tabelados (F tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer, determina-se se há ou não o efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta. Os valores de (F tabelado) são estabelecidos para um determinado nível de significância, no caso de 95%. A hipótese de que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se (F calculado) for maior do que (F tabelado). Os resultados obtidos na ANOVA foram realizados através do *software* *Statística*.

5.2.1.4 Considerações gerais sobre a confecção dos blocos de concreto

A moldagem dos blocos de concreto para pavimentação foi realizada em uma empresa localizada na região metropolitana de Porto Alegre. O processo de fabricação dos produtos é automatizado e a dosagem dos materiais – agregados, cimento, PAE e água – foi realizada em massa. Os traços utilizados para a confecção dos blocos de concreto seguiram o ajuste da curva granulométrica de dosagem da máquina de vibro-prensa. Esta curva foi ajustada com auxílio de técnicos especializados, que, em função dos tipos de materiais existentes na região, ajustaram os limites de dosagem superior e inferior.

O controle de água é importante, pois, se dosada excessivamente, ocorrerão problemas de desforma e deformações indesejadas nas peças durante o transporte para as câmaras de cura. Para evitar esses tipos de problemas, os quais ocasionam custos para a empresa, um medidor automático de umidade no interior do misturador registra a umidade do concreto e, assim, o operador do equipamento pode rapidamente adicionar água, controle, este, com auxílio de um hidrômetro, até atingir uma umidade ideal para a mistura que proporcione uma boa confecção e, conseqüentemente, qualidade às peças de concreto.

A empresa possui traços pré-definidos para cada produto. A partir das suas especificações e através de um programa computacional, obtém-se as quantidades de materiais necessários. Este, conectado a um sistema de balanças localizadas nos silos dos agregados e do cimento, realiza uma dosagem automatizada dos materiais. O misturador é de eixo vertical e a máquina é do tipo vibro-prensa, modelo SV 400, cujas características são apresentadas na tabela 36.

Tabela 36 Características da vibro-prensa utilizada na confecção dos blocos de concreto para pavimentação.

Sistema de vibração	
Motor de direção	
força – 4 x 7,5 kW	
Proteção – IP 54	
Unidade hidráulica	
Força	37 kW
Proteção	IP 54
Velocidade	1500 rpm
Capacidade do tanque de óleo	600 l
Capacidade da bomba	140 l/min
Pressões	
Pressão – estágio I	10 – 12 MPa
Pressão – estágio II (max. 3 – 5 segundos)	14 – 16 MPa
Pressão do headload hidráulico	0 – 4 MPa

Dados fornecidos pelo fabricante.

Os agregados, para a confecção dos blocos de concreto, foram dosados entre limites da curva de dosagem da vibro-prensa. Como o PAE não estava nos limites desta curva, ele foi adicionado como fíler.

5.2.1.5 Moldagens dos blocos de concreto intertravados para pavimentação utilizando diferentes teores do PAE

A moldagem dos blocos de pavimentação pré-moldados foi realizada em duas etapas. Na primeira, o traço utilizado (em massa) foi: **1: 2,94: 1,98: 1,14: 0,42** (cimento: areia fina: areia grossa: pedrisco: relação água/cimento). Adicionaram-se teores do PAE de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento, mantendo-se fixas as quantidades de materiais e a relação a/c. Também realizou-se a moldagem de blocos isentos do PAE (0%) como referência. A primeira etapa caracterizou-se em manter constante a relação água/cimento para a confecção dos blocos com diferentes percentuais do PAE.

A segunda etapa de moldagem dos blocos baseou-se em dois critérios: o primeiro foi de manter-se constante o índice de umidade do concreto para cada traço, medido com auxílio de um sensor localizado no interior do misturador; o segundo caracterizou-se em manter constante a proporção (em massa) dos agregados, por ser, este procedimento, padrão da empresa. Para atender a este último critério, de modo que a proporção dos agregados

permanecesse nos limites da curva de dosagem da vibro-prensa, foram moldados 4 traços distintos conforme o procedimento padrão da empresa: o referência (0% de adição do PAE) e outros 3 traços contendo teores do PAE de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento.

A seguir, são apresentados os traços utilizados na segunda etapa, na seguinte ordem (cimento: areia fina: areia grossa: pedrisco: PAE: relação água/cimento):

- 1: 2,42: 1,69: 1,02: 0,00: 0,42 – denominado como “0%”;
- 1: 2,39: 1,67: 1,01: 0,05: 0,41 – denominado como “5%”;
- 1: 2,36: 1,65: 1,00: 0,15: 0,40 – denominado como “15%”;
- 1: 2,33: 1,63: 0,99: 0,25: 0,38 – denominado como “25%”;

Nas duas etapas do programa experimental para a confecção dos blocos pré-moldados de concreto para pavimentação, a vibro-prensa foi ajustada para trabalhar sob pressão no estágio II – 16 MPa com 5 segundos de alimentação. O modelo comercial dos blocos moldados foi *Uni-stein*.

Após a vibro-compressão, os blocos, através de esteira, foram levados a um sistema de prateleiras automatizado e, posteriormente, às câmaras de cura. Estas são desprovidas de qualquer sistema climatizado, seja de umidade ou vapor. São câmaras protegidas das intempéries, sendo permitida apenas a circulação de ar. A capacidade de produção para cada ciclo da vibro-prensa é de 45 blocos ou 1,2 m². Para este trabalho, foram suficientes cinco ciclos para cada teor adicionado, totalizando 225 blocos.

Nas duas etapas do programa experimental, os blocos sem adição do PAE foram removidos das câmaras de cura 12 horas após a moldagem, procedimento este que não pode ser realizado para os blocos utilizando o resíduo, pois os mesmos não apresentavam resistência mecânica suficiente para que o equipamento os colocassem nos paletes de madeira. A retirada dos blocos contendo o PAE das câmaras de cura foi realizada 72 horas após a moldagem. Já a colocação nos paletes de madeira foi realizada manualmente, pois com o auxílio do equipamento eles se desagregaram.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PASTAS MOLDADAS EM LABORATÓRIO

6.1.1 Determinação dos tempos de pega e calor de hidratação

A determinação da água de consistência normal, conforme NBR 11580(ABNT, 1991), para a pasta referência (0%) e para as pastas contendo adição do PAE de 5%, 15% e 25%, necessária para moldagem de pastas para determinação dos tempos de pega, está indicada na tabela 37.

Tabela 37 Valores obtidos no ensaio de consistência normal (%H₂O) para a pasta de cimento referência (0%) e pastas contendo 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento.

Teor do PAE (%)	Cimento (g)	PAE (g)	Cimento + PAE (g)	Relação a/c	Água de consistência (%)
0	500,0	0,0	500,0	0,310	31,0
5		25,0	525,0	0,300	30,0
15		75,0	575,0	0,290	29,0
25		125,0	625,0	0,265	26,5

PAE – pó de aciaria elétrica.

Os resultados observados na tabela 37 mostraram que, mantendo-se fixa a quantidade de cimento e aumentando-se os teores do PAE, menor foi a quantidade de água necessária para uma mesma consistência normal. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por LEITE (2000), apresentados na tabela 4 (p. 20). Diferentemente dos materiais convencionais em engenharia, que, quanto menor a granulometria (maior área específica), maior é a quantidade de água necessária para atingir uma mesma trabalhabilidade, o acréscimo do PAE, mesmo com a dimensão reduzida dos seus grãos (diâmetro médio de 0,83 μm), não requer o aumento de água. Este efeito está provavelmente associado à massa específica do PAE (4,44 kg/dm³), que desloca uma parte da água presente entre os grãos floculados do cimento, aumentando, assim, a quantidade de água disponível para fluidificar a pasta ou o concreto. Além disso, a forma esférica do PAE pode proporcionar um efeito lubrificante agindo como um pequeníssimo rolamento, assim como é citado por AÏTCIN

(2000) ao referir que alguns grãos com forma esférica, menores que o grão de cimento, podem proporcionar um efeito de rolamento no traço utilizado.

Os tempos de início e fim de pega, conforme NBR 11518 (ABNT, 1991), de pastas de cimento Portland CP II – Z, com diferentes teores do PAE, encontram-se na tabela 38.

Tabela 38 Resultados do ensaio dos tempos de início e fim de pega para a pasta de cimento referência (0%) e as pastas contendo adição do PAE em teores de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento.

Teor do PAE (%)	Água de consistência (%)	Tempos de pega (h:m)		Limites da norma brasileira	
		Início	Fim	Início de pega	Fim de pega
0*	31	03:44	05:12	≥ 1 h	≤ 10 h
5	30	-	-		
15	29	12:00	24:00		
25	26,5	<12:00	<24:00		

PAE- pó de aciaria elétrica

* - fornecido pelo fabricante

Houve variabilidade nos tempos de início e fim de pega para pastas contendo PAE, pois nota-se que a pasta com 15% do resíduo apresentou maiores tempos de início e fim de pega quando comparados aos obtidos pela pasta contendo 25%. E mais, apesar de as pastas com 15% e 25% atingirem o fim de pega, as mesmas apresentavam-se ressecadas e muito friáveis, resultados que confirmam os encontrados por LEITE et al. (2000). Desta forma, não se realizou a determinação dos tempos de pega para a pasta com 5%, uma vez que este ensaio não se mostrou adequado para pastas contendo o PAE.

6.1.2 Determinação do calor de hidratação

Em virtude de os resultados do ensaio de determinação dos tempos de pega das pastas contendo PAE com aparelho de Vicat não terem sido coerentes, lançou-se mão do ensaio de calorimetria. Foi determinado o calor de hidratação da pasta de cimento referência (0%) e das pastas com adição de 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento. Os resultados obtidos neste ensaio, em um período de 96 horas, podem ser visualizados na figura 14.

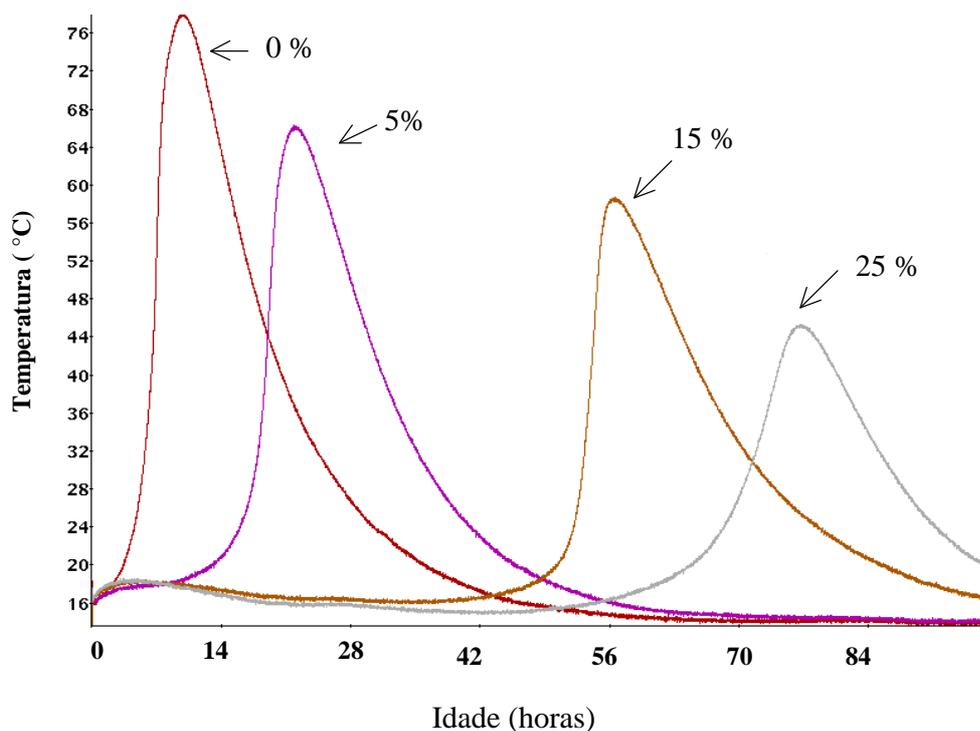


Figura 14 Calor de hidratação da pasta de cimento referência (0%) e das pastas com adição de 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento, ao longo do tempo.

Os valores máximos obtidos para os picos de temperatura para pasta referência e para as pastas com 5%, 15% e 25% de adição do PAE foram de aproximadamente 10, 22, 56 e 78 h, respectivamente, conforme ilustra a figura 14. É possível verificar o efeito retardador proporcionado pelo PAE nas pastas de cimento, que se acentua com o acréscimo de adição do resíduo. Também nota-se que a forma da curva da pasta referência apresenta uma base mais estreita e de maior altura, demonstrando uma maior liberação de calor em menor espaço de tempo. Já com o acréscimo do teor de PAE, a curva, em relação à referência, diminui a altura e aumenta a base. Isto significa uma liberação de calor de hidratação mais lenta, beneficiando em especial o caso de concreto massa, utilizado em barragens.

6.1.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica das pastas com diferentes teores do PAE foi determinada com idades de 7 e 28 dias.

Nas figuras 15, 16, 17 e 18 estão apresentados os difratogramas das amostras da pasta de cimento referência (0%) e das pastas de cimento com adição do PAE nos teores de 5%, 15% e 25%, respectivamente, com idades de 7 dias.

Contagem/s

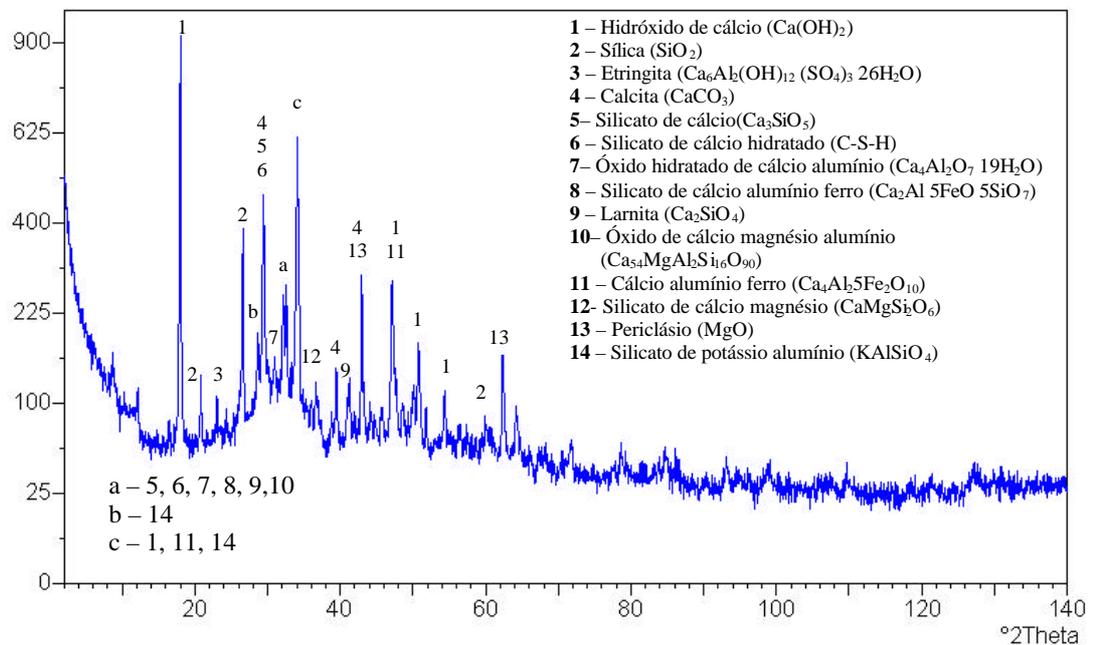


Figura 15 Difratograma da amostra de pasta de cimento referência, com idade de 7 dias.

Contagem/s

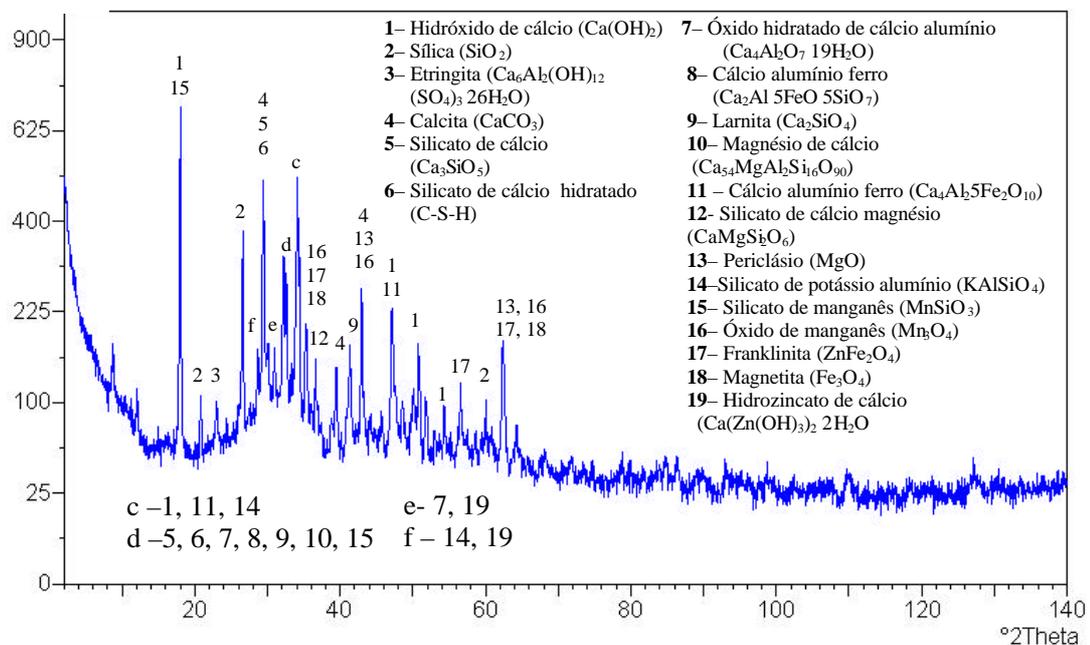


Figura 16 Difratograma da amostra de pasta contendo 5% de adição do PAE, com idade de 7 dias.

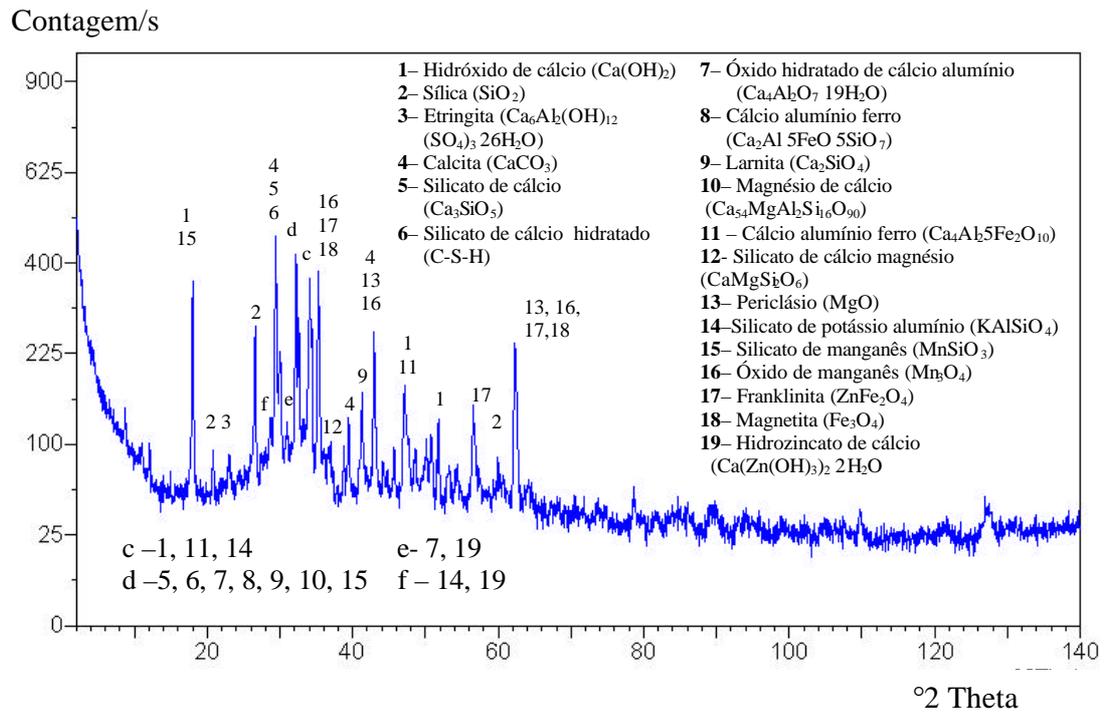


Figura 17 Difratoograma da amostra de pasta contendo 15% de adição do PAE, com idade de 7 dias.

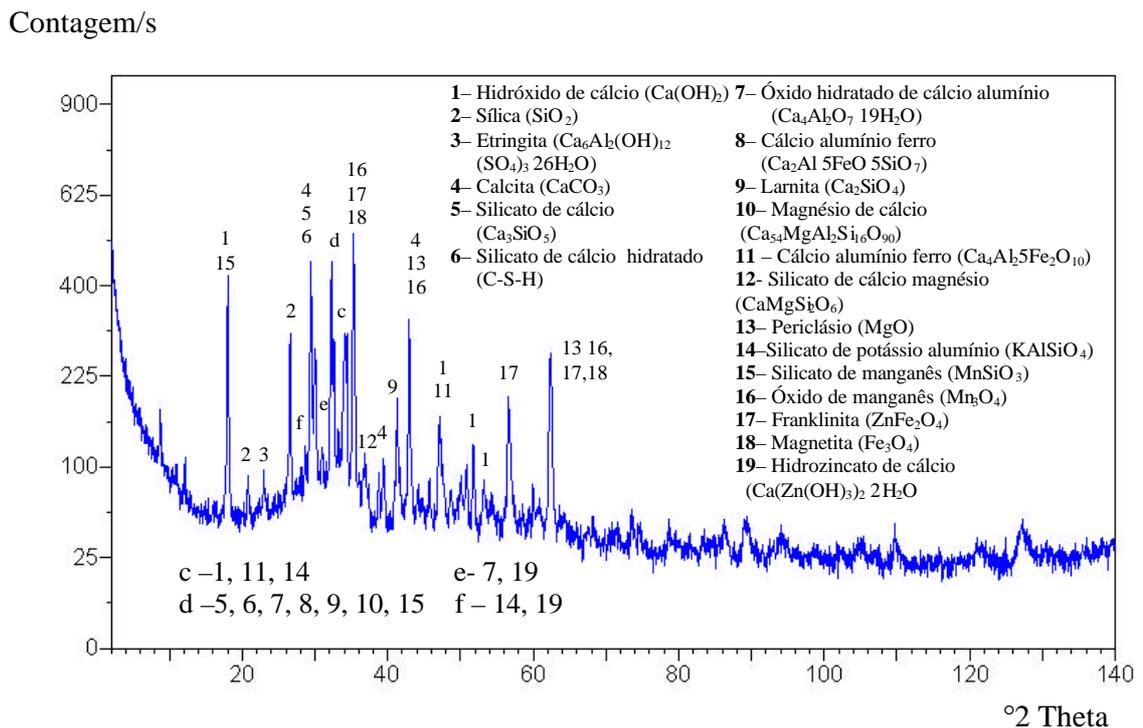


Figura 18 Difratoograma da amostra de pasta contendo 25% de adição do PAE, com idade de 7 dias.

No difratograma da pasta de cimento referência, identificaram-se 14 fases que compõem a amostra. Entre elas: hidróxido de cálcio – fase 1, sílica – fase 2, etringita – fase 3 e silicatos de cálcio hidratados – fase 6. Há fases, onde os picos que as identificam coincidem. Por outro lado, nas pastas contendo o PAE, além das fases observadas na pasta referência, constataram-se mais 5 novas fases. Nestas, também houve fases onde os picos que as identificam coincidem. Este é o caso dos picos característicos de hidrozincato de cálcio – fase 19 – que estão sobrepostos a picos característicos de fases já encontradas na pasta de referência, em mesma idade, como óxidos hidratados de cálcio alumínio – fase 7 e silicatos de potássio alumínio – fase 14. Outros picos característicos como óxidos de manganês – fase 16, franklinita – fase 17 e magnetita – fase 18 – coincidem com picos característicos da fase de periclásio – fase 13, também constatada na pasta referência. Segundo a AMERICAN ASSOCIATION (1985), quando há fases onde os picos que as identificam coincidem, o método de difração de raios-x não permite determinar qual destas ou se todas estão presentes.

Comparando-se as análises de difração do PAE (figura 10, p. 57) com as análises das pastas de cimento contendo o resíduo (capítulo 6), constataram-se que fases encontradas de cromita, óxidos de ferro e cálcio, zincita, pirolusita e óxidos cromo manganês não foram identificadas nas pastas de cimento em nenhum dos teores analisados. Isto provavelmente ocorreu devido às reações destes compostos com os produtos da hidratação do cimento ou ao fato de as suas concentrações estarem abaixo dos 5%, não sendo, assim, identificadas pelo equipamento. Do contrário, encontraram-se fases de tridimita (SiO_2) – fase 2, magnetita – fase 18 e a franklinita – fase 17 tanto na amostra do PAE quanto nas pastas contendo distintos teores do resíduo.

Não foram identificados compostos de hidróxido de zinco. Segundo ARLIGUIE e GRANDET (1990), estes estariam na forma amorfa.

Observou-se, nos gráficos de difração, que os picos do hidróxido de cálcio diminuíram com o acréscimo dos teores do PAE. Isto ocorreu, provavelmente, com a redução de material cimentante utilizado, devido à adição do resíduo, bem como pelo possível consumo do hidróxido de cálcio pelos metais presentes no PAE. Além disso, o efeito retardador causado pelo PAE pode ter inibido a formação do hidróxido de cálcio.

O aumento do teor do PAE de 5% para 25% não influenciou no acréscimo de novas fases nas pastas de cimento.

Nas figuras 19, 20, 21 e 22 estão apresentados os difratogramas das amostras da pasta de cimento referência (0%) e das pastas com adição de PAE de 0%, 5%, 15% e 25%, respectivamente, com idades de 28 dias.

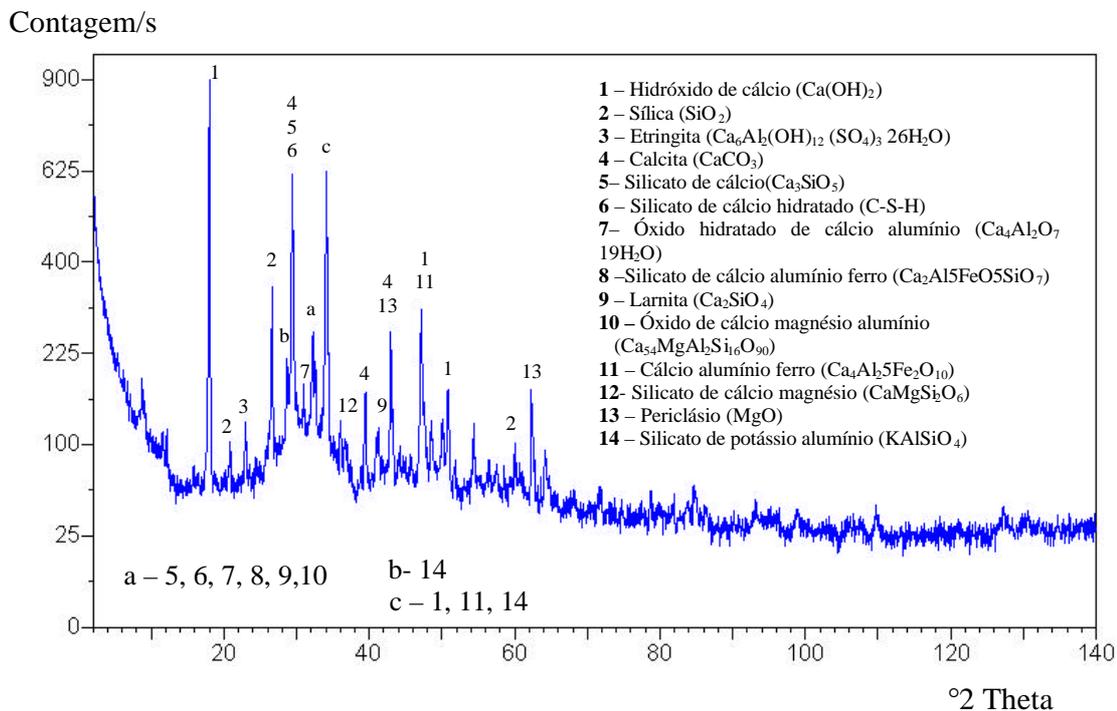


Figura 19 Difratograma da amostra da pasta de cimento referência, com idade de 28 dias.

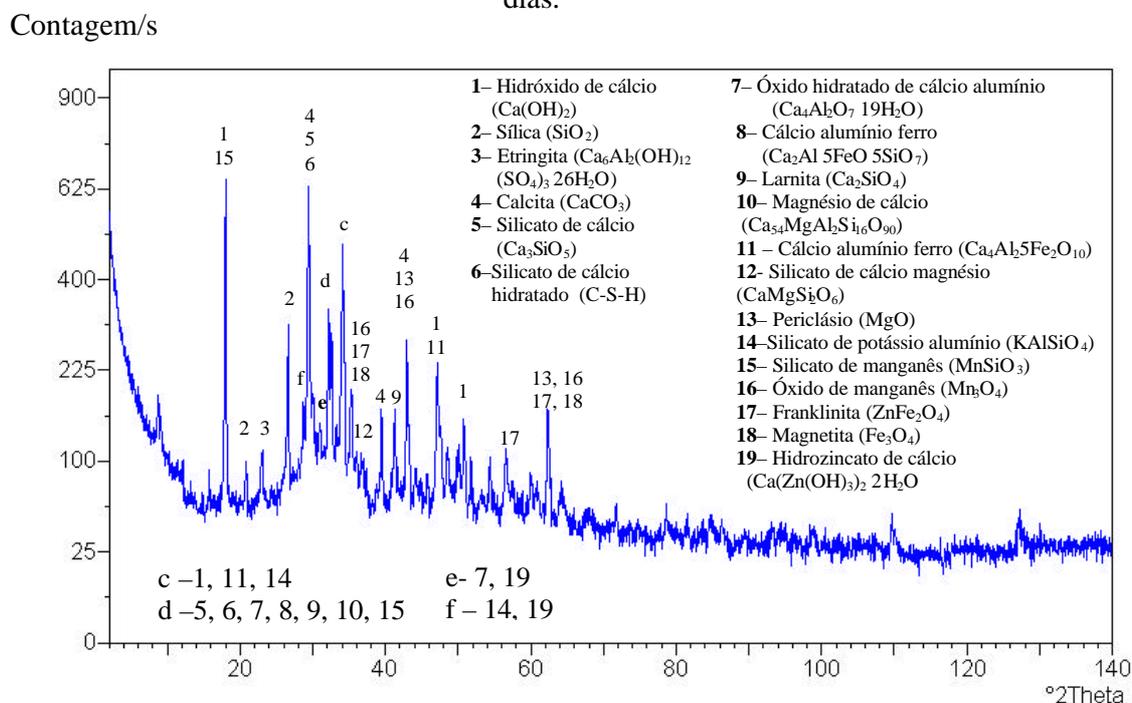


Figura 20 Difratograma da amostra de pasta contendo 5% de adição do PAE, c de 28 dias.

Contagem/s

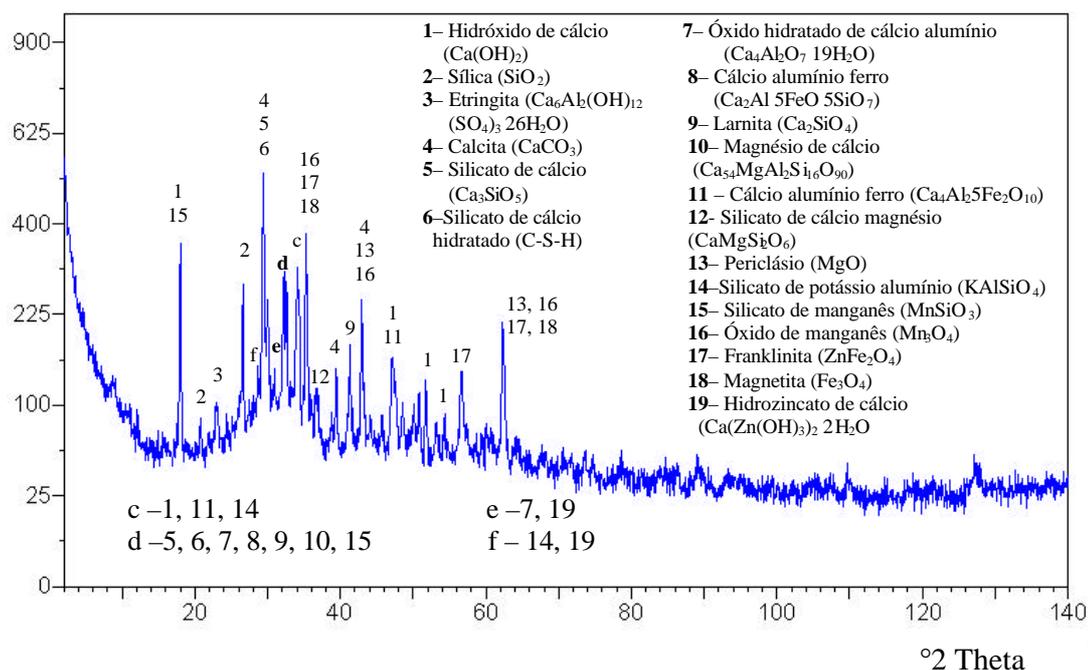


Figura 21 Difratoograma da amostra de pasta contendo 15% de adição do PAE, com idade de 28 dias.

Contagem/s

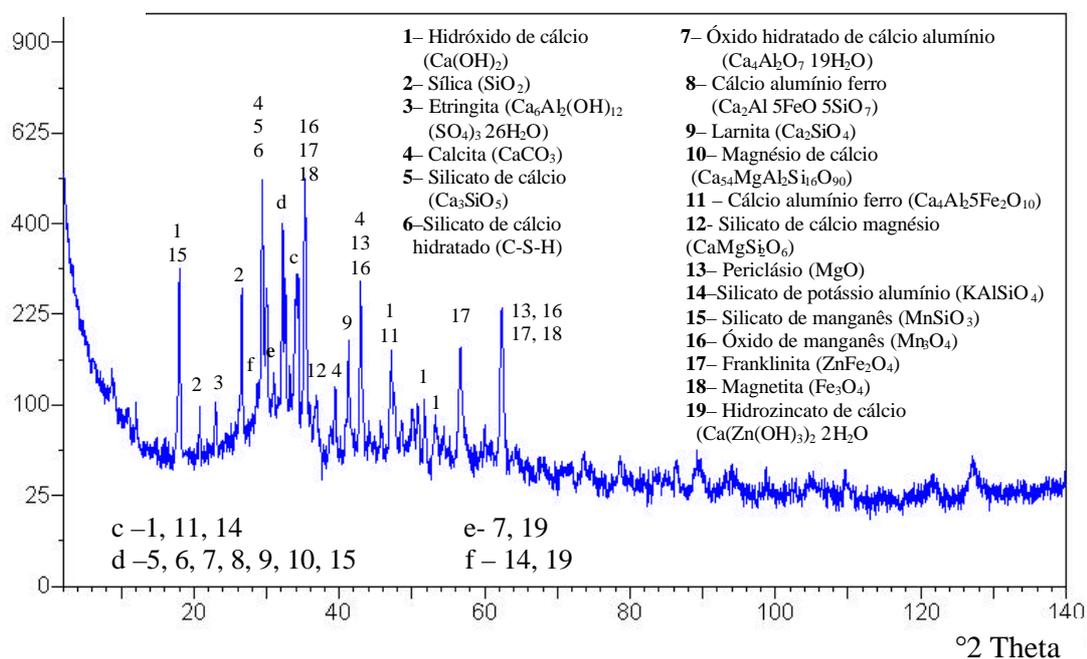


Figura 22 Difratoograma da amostra de pasta contendo 25% de adição do PAE, com idade de 28 dias.

O que foi discutido na análise dos resultados de difração por raios-x para as amostras de pastas de cimento com adições do PAE com idade de 7 dias é válido para as pastas com idade de 28 dias. Observou-se que as fases identificadas são as mesmas para ambas as idades.

6.1.4 Caracterização microestrutural

Com vistas a observar a microestrutura e a formação de compostos contendo zinco, foram moldadas pastas com adições de 5%, 15% e 25% do PAE em relação à massa de cimento, assim como uma pasta referência sem adição do resíduo, as quais foram analisadas nas idades de 7 e 28 dias.

Observa-se, na figura 23, a microestrutura da pasta de cimento sem adição do PAE, com idade de 7 dias. O ponto 1 indica onde foi realizada análise por EDS. Não é mostrada a microestrutura da pasta com adição de 5% do PAE, pois não se verificaram diferenças no aspecto microestrutural em relação à pasta referência.

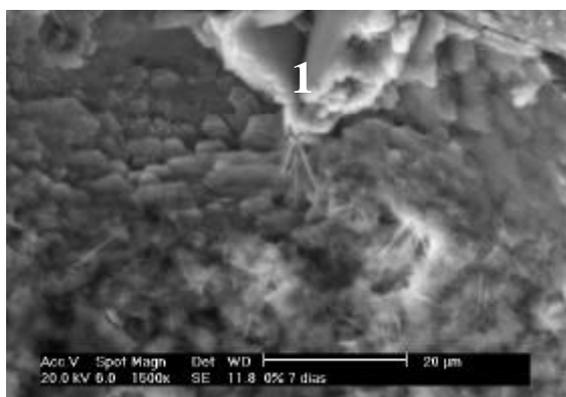


Figura 23 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta sem adição do PAE, com idade de 7 dias, magnitude 1500 x. O ponto 1 indica a análise de EDS.

Na tabela 39, estão os resultados dos elementos identificados na análise por EDS, realizados no ponto 1 e indicado na figura 23.

Tabela 39 Análise química elementar por EDS realizada no ponto 1 e indicado na figura 23, da pasta de cimento isenta do PAE, com idade de 7 dias.

N°	Elementos (%)												
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zn	Mn	Na	Cr	Ni
1	26,6	9,3	-	22,6	-	-	29,9	11,6	-	-	-	-	-

Já na figura 24, mostra-se a microestrutura de uma pasta contendo adição de 15% do PAE, com idade de 7 dias. Os pontos 2 e 3 indicam onde foram realizadas análises por EDS, cujos resultados são mostrados na tabela 40.

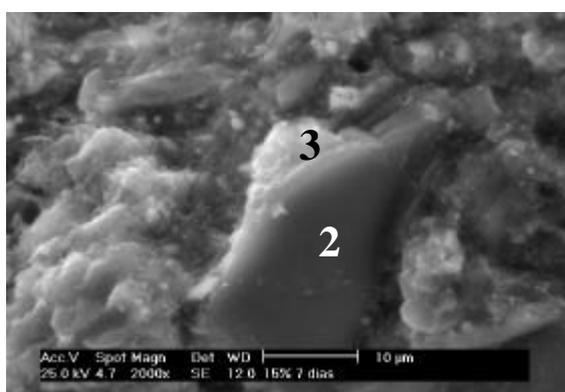


Figura 24 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta contendo adição de 15% do PAE, idade de 7 dias, magnitude 2000 x. Os pontos 2 e 3 referem-se à análise de EDS.

Tabela 40 Análises por EDS, indicadas na figura 24 pelos pontos 2 e 3, da pasta de cimento contendo 15% de adição do PAE, idade de 7 dias.

N°	Elementos (%)												
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zn	Mn	Na	Cr	Ni
2	32,5	-	-	-	0,9	-	61,5	1,4	2,1	-	1,5	-	-
3	35,6	1,8	3,8	10,9	1,5	1,5	36,3	6,0	2,7	-	-	-	-

A microestrutura da pasta contendo 25% de adição do PAE, idade de 7 dias, encontra-se na figura 25. O ponto 4 (indicado pela letra x) indica onde se realizou a análise por EDS, cujos resultados apresentam-se na tabela 41.

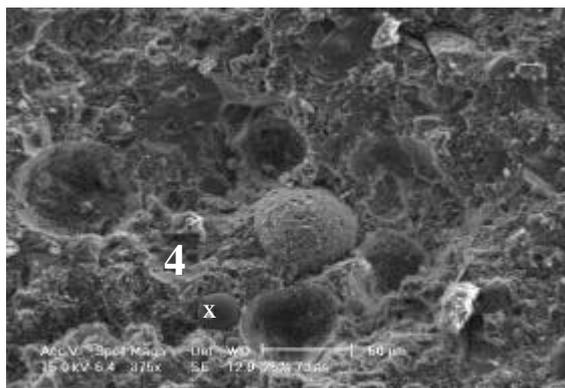


Figura 25 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da pasta de cimento contendo adição de 25% do PAE, idade de 7 dias, magnitude 375 x. A análise de EDS realizada no ponto 4 está indicada pela letra x.

Tabela 41 Análise química elementar por EDS do ponto 4 (indicado pela letra x na figura 25) da pasta de cimento contendo adição do PAE de 25%, com idade de 7 dias.

Nº	Elementos (%)												
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zn	Mn	Na	Cr	Ni
4	23,5	0,7	-	1,9	-	-	2,5	55,0	9,0	0,8	-	-	2,4

Observando a figura 23, com auxílio da análise química elementar de EDS realizada no ponto 1, nota-se a presença de um produto de hidratação, como esperava-se, pois trata-se de uma pasta isenta do PAE. Já na figura 24, que representa a microestrutura da pasta contendo 15% de adição do PAE, com o auxílio de EDS, verificou-se a presença de zinco nos produtos hidratados, conforme resultados obtidos nos pontos 2 e 3 (tabela 40). Na figura 25 (microestrutura da pasta contendo 25% do PAE) identificou-se, aparentemente, um grão de PAE inerte na pasta, cujo resultado de EDS no ponto 4 (tabela 41) constatou-se uma percentagem maior de zinco em relação aos índices encontrados com adição de 15%.

Portanto, até 5% do PAE não se observaram diferenças na microestrutura da pasta, em relação à isenta de resíduo. Já para a microestrutura das pastas com 15% e 25% do PAE, verificou-se a presença de produtos contendo zinco, elevando seus níveis com maiores adições do PAE.

Na figura 26, encontram-se as microestruturas de pastas contendo teores do PAE de 0%, 5%, 15% e 25%, com idade de 28 dias. Os números apresentados na figura indicam os pontos onde foram realizadas as análises por EDS.

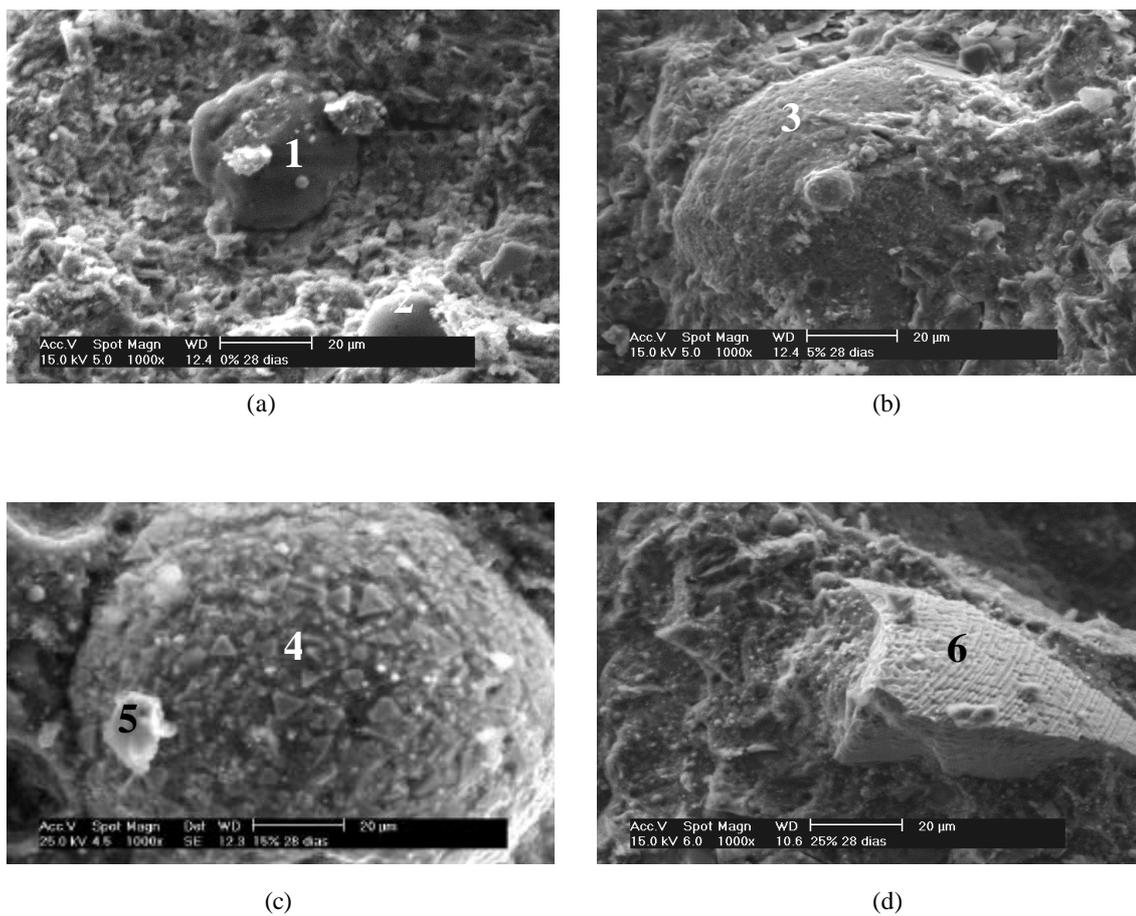


Figura 26 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários das pastas com idade de 28 dias, magnitude de 1000x, (a) referência (0%) com adições do PAE de (b) 5% (c) 15% (d) 25%. Os pontos indicados na figura representam análises por EDS.

Na tabela 42, estão indicadas as análises por EDS, representadas pelos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 na figura 26, das pastas contendo diferentes teores do PAE, com idades de 28 dias.

Tabela 42 Análise química elementar por EDS, realizada na pasta de cimento referência (0%) e nas pastas de cimento contendo adições do PAE em teores de 5%, 15% e 25%, com idade de 28 dias, e indicadas nos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 na figura 26.

Nº	Elementos (%)											
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zn	Mn	Na	Cr
1	44,9	-	12,4	34,8	-	2,90	5,02	-	-	-	-	-
2	52,6	-	3,6	13,0	-	-	30,8	-	-	-	-	-
3	32,2	-	1,55	2,86	-	1,9	22,0	35,4	-	4,09	-	-
4	10,6	-	1,5	2,0	-	-	9,9	73,7	-	-	0,9	1,4
5	22,9	3,5	1,4	9,7	1,1	1,2	56,1	4,1	-	-	-	-
6	41,4	-	1,61	1,54	-	-	2,56	52,9	-	-	-	-

Na figura 26a (pasta de cimento com idade de 28 dias, isenta do PAE), identificaram-se elementos comuns de produtos da hidratação do cimento (pontos 1 e 2 na tabela 42). Já na figura 26b, nota-se a presença de um grão rico em Fe (conforme análise por EDS no ponto 3 e resultados na tabela 42), aparentemente do PAE. Pelo teor de cálcio encontrado (22,0%) e pela menor percentagem de silício (2,86%) no ponto 3, trata-se, provavelmente, de um produto resultante das reações de hidratação do cimento com o PAE, entretanto estudos mais aprofundados neste sentido merecem ser feitos. Na figura 26c, constata-se aparentemente que o grão do PAE (identificado por EDS no ponto 4, cujos resultados estão na tabela 42) não está inerte, verificando-se a presença de depósitos de produtos de hidratação do cimento, como identificado no ponto 5 (resultados na tabela 42). Na figura 26d, observa-se que no ponto 6 o resultado de EDS indicou uma percentagem de Fe de 52,9 (tabela 42), sugerindo, desta forma, a presença de PAE, mas em uma forma desagregada, possivelmente decorrente do preparo da amostra para a microscopia. Verificou-se, também, a presença de etringita nas pastas referência e nas pastas contendo 5% do PAE, conforme figura 27. Este produto de hidratação também foi identificado nas difrações de raios-x de pastas com 7 e 28 dias (capítulo 6).

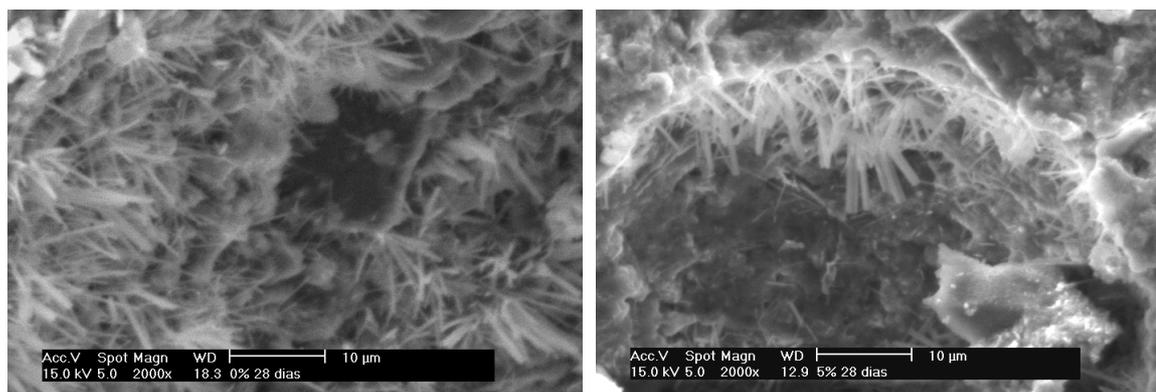


Figura 27 Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários das pastas de cimento com idade de 28 dias **(a)** referência (0% do PAE) magnitude 2000 x **(b)** 5% do PAE magnitude 2000 x.

Portanto, com idade de 28 dias, constatou-se que, aparentemente, estão ocorrendo reações com o PAE, pois a estrutura superficial do grão não se apresentou lisa e sem poros como observou-se na micrografia do grão do PAE, conforme figura 11 (p.60).

Além disso, para a caracterização microestrutural de pastas de cimento que possuem adição de cinza volante (como o CP II-Z utilizado), faz-se necessário o auxílio de EDS, pois o grão do PAE confunde-se com o grão da cinza volante.

6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Os resultados referentes aos ensaios em blocos de concreto contendo distintos teores do PAE estão apresentados nos itens 6.2.1 e 6.2.2, referentes à primeira e à segunda etapas, respectivamente, pois o programa experimental com os blocos foi realizado em duas etapas.

6.2.1 Primeira etapa do programa experimental

A primeira etapa do programa experimental se desenvolveu adotando um traço referência (0%), e, em relação à massa de cimento, adicionaram-se teores do PAE com 5%, 15% e 25%. A característica desta etapa é que se manteve constante a relação água/cimento (a/c).

O acréscimo do teor do PAE, para uma mesma relação a/c, resultou em um aumento do índice de umidade do concreto (cujo sensor localiza-se no misturador). Foi possível notar visualmente este aumento pelo aspecto superficial dos blocos na correia transportadora, após a confecção na vibro-prensa. Este efeito foi acentuado nos blocos com 25% do PAE, os quais tiveram sua desforma prejudicada devido à sua aderência nos moldes da vibro-prensa, levando à perda de seu formato adequado, pelo excesso de umidade.

Observa-se, na figura 28, o aspecto dos blocos com idade de 5 dias.



Figura 28 Aspecto dos blocos de concreto com idade de 5 dias. Da esquerda para direita: 25%, 15%, 5% de adição do PAE em relação à massa de cimento e os referência (0%).

Nota-se que, com o acréscimo do teor do PAE, a tonalidade do bloco fica mais escura, conseqüência de o resíduo apresentar uma cor marrom escura. Também percebe-se que as arestas do bloco com 25% estão arredondadas devido ao excesso de umidade superficial, conforme citado anteriormente, perdendo sua função de intertravado.

6.2.1.1 Propriedades mecânicas

Para a determinação das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios à compressão axial e desgaste por abrasão.

6.2.1.1.1 Ensaios de resistência à compressão

A NBR 9781 (ABNT, 1987) estabelece que a resistência característica mínima para comercialização dos blocos de concreto para pavimentação é de 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha. Os blocos de concreto estudados neste trabalho enquadram-se nesta classificação. Para tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão, a resistência característica é maior ou igual a 50 MPa.

Os valores, em MPa, da resistência individual à compressão, da resistência média (f_p), conforme procedimentos da NBR 9780 (ABNT, 1987) e do desvio padrão (s), para blocos de concreto para pavimentação com diferentes adições do PAE, ao longo do tempo, estão indicados na tabela 43.

Tabela 43 Valores, em MPa, da resistência individual à compressão, da resistência média (f_p) e do desvio padrão (s), para blocos de concreto para pavimentação com diferentes adições do PAE, ao longo do tempo.

Teor do PAE (%)	Resistência à compressão individual dos blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores do PAE (MPa)					
	Idade de ruptura dos blocos de concreto (dias)					
	7	14	21	28	91	182
0	26,2	-	36,7	40,4	40,4	47,0
	25,3	-	37,2	37,2	37,2	50,7
	24,7	-	37,6	39,9	39,9	50,0
	30,5	-	34,1	37,6	37,6	48,0
	25,6	-	36,7	38,7	38,7	47,8
	24,8	-	37,5	36,7	36,7	54,9
fp	26,2	-	36,6	38,4	45,2	49,7
s	2,2	-	1,3	1,5	1,51	2,89
5	38,7	42,1	38,4	50,0	47,3	43,5
	33,6	39,8	44,4	48,3	42,1	54,6
	39,8	42,2	39,9	45,9	49,8	52,6
	36,9	41,3	42,2	49,6	52,3	46,4
	41,5	41,6	40,6	46,1	51,8	46,6
	39,2	43,2	42,4	39,0	50,4	52,9
fp	38,2	41,7	41,3	46,5	45,5	49,4
s	2,7	1,1	2,1	4,0	3,78	4,49
15	34,2	37,8	42,4	50,4	54,4	63,5
	38,2	42,1	41,8	49,3	56,3	61,1
	31,0	39,0	43,6	51,0	51,7	55,7
	28,5	44,7	36,2	46,3	53,7	59,7
	37,8	40,7	43,0	49,8	55,4	60,9
	35,6	43,3	51,5	46,4	49,0	53,7
fp	34,2	41,3	43,1	48,9	51,0	59,1
s	3,8	2,6	4,9	2,1	2,65	3,69
25	36,5	32,4	42,9	47,6	48,1	54,9
	35,9	40,9	43,0	46,3	51,7	60,6
	31,5	39,8	43,3	40,2	56,0	57,8
	33,9	42,9	36,7	50,6	56,7	53,3
	34,4	39,0	39,2	50,1	55,0	55,7
	33,9	35,8	38,4	54,1	49,0	55,2
fc	34,3	38,4	40,1	48,1	49,4	56,2
s	1,8	3,8	2,8	4,7	3,69	2,57

Os valores da resistência característica à compressão, conforme NBR 9781 (ABNT, 1987), o desvio padrão, consumo teórico de cimento/m³ (C) e relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto contendo diferentes adições do PAE, encontram-se na tabela 44.

Tabela 44 Valores da resistência característica à compressão ($f_{pk} = f_p - t * s$), desvio padrão (s), consumo de cimento/m³ (C) e relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto de pavimentação contendo distintos teores de PAE

Teor do PAE (%)	Resistência característica à compressão (f_{pk}) (MPa)						C** (kg/dm ³)	a/c
	Idade de ruptura dos blocos de concreto (dias)							
	7	14	21	28	91	182		
0	24,2	*	35,4	37,0	43,4	47,1	331,0	0,42
s	2,2	*	1,3	1,5	1,51	2,89		
5	35,8	40,7	39,4	42,8	45,5	45,3	329,0	
s	2,7	1,1	2,1	4,0	3,78	4,49		
15	30,7	38,9	38,6	47,0	51,0	55,7	327,0	
s	3,8	2,6	4,9	2,1	2,65	3,69		
25	32,7	35,0	38,0	43,8	49,4	53,9	325,0	
s	1,8	3,8	2,8	4,7	3,69	2,57		

* por problemas operacionais, não foi determinada a resistência característica dos blocos referência com idade de 14 dias

** consumo teórico de cimento desprezando os vazios

Conforme tabela 44, os valores obtidos para o desvio padrão dos blocos sem adição do PAE foram inferiores aos dos blocos contendo o resíduo. Isto significa que a utilização do PAE causou uma maior variabilidade nos resultados de resistência à compressão para blocos de concreto de pavimentação.

Na figura 29, são ilustrados os valores de resistência característica à compressão (f_{pk}) para os blocos com diferentes teores do PAE ao longo do tempo.

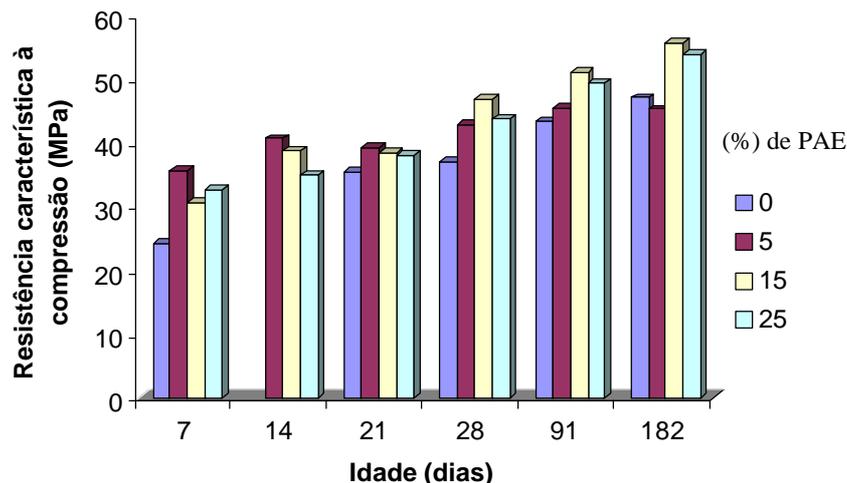


Figura 29 Determinação da resistência característica à compressão, ao longo do tempo, para blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores do PAE

*Obs: Por problemas operacionais, não foi realizado o ensaio aos 14 dias para blocos referência (0%).

Conforme os resultados da resistência característica dos blocos de concreto, ilustrados na figura 29, com exceção dos blocos com 5% aos 182 dias, todos, contendo PAE, apresentaram resistências superiores às dos blocos sem adição do resíduo. Os blocos com 5% adquiriram a resistência mínima (35MPa) exigida pela NBR 9781 (ABNT, 1987) aos 7 dias. Já os blocos com 15% e 25% adquiriram esta resistência mínima a partir dos 14 dias.

A tabela 45 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística da influência do teor do PAE adicionado, da idade dos blocos e da interação destas duas variáveis nos resultados de resistência à compressão dos blocos de concreto, ao nível de significância de 95%.

Tabela 45 Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do PAE adicionado e da interação das duas variáveis na resistência à compressão dos blocos de concreto.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Idade	3	466,568	47,675	2,68	S
Teor de pó	5	1365,282	139,507	2,27	S
Idade x Teor	15	33,054	3,377	1,75	S
Erro	120	9,786			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

F_{calc}<F_{0,05}: NS

Com base nos resultados obtidos na ANOVA, tabela 45, pode-se constatar que tanto a idade quanto os teores do PAE adicionados apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à compressão dos blocos de concreto, assim como a interação entre estas duas variáveis. Esses comportamentos podem ser observados nas figuras 30 a 32.

A figura 30 ilustra o efeito isolado do teor de PAE na resistência à compressão dos blocos de concreto.

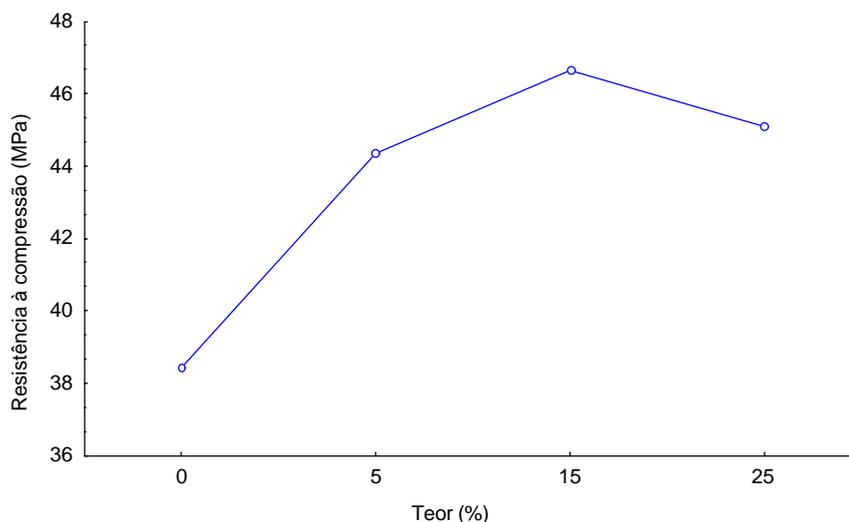


Figura 30 Efeito isolado dos teores de PAE na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação

Nota-se, na figura 30, que os blocos de concreto com teor de PAE com 15% obtiveram um melhor desempenho mecânico em relação aos outros blocos.

O aumento de resistência nos produtos com o resíduo está de acordo com os obtidos por HAMILTON e SAMMES (1999) e por AL ZAID et al. (1997), vistos no capítulo 3.

O acréscimo da resistência à compressão nos blocos com adição do PAE deve-se provavelmente a dois fatores, um físico e outro químico.

Do ponto de vista físico, pelo efeito fíler²⁸, o PAE, possuindo uma fina granulometria (\emptyset médio de 0,83 μm), proporciona um melhor preenchimento dos vazios,

²⁸ O fíler é um material finamente moído, com uma finura igual ou inferior à do cimento Portland, que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto. Usualmente são inertes. Podem também ativar a hidratação do cimento atuando como ponto de nucleação (NEVILLE, 1997).

aumentando a compactidade dos blocos, e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Somado a este efeito, partículas de PAE podem estar servindo de pontos de nucleação para a hidratação do cimento, diminuindo os capilares e favorecendo o refinamento da estrutura dos blocos de concreto. A queda ocorrida na resistência à compressão para os blocos com 25% do PAE, em relação aos com 15%, conforme ilustra a figura 30, pode ser relacionada ao excesso de finos.

Do ponto de vista químico, o aumento da resistência pode ser atribuído ao zinco contido na composição do PAE, como foi verificado por HAMILTON e SAMMES (1999) e por TASHIRO et al. (1977), já apresentado no capítulo 3, sendo este elemento também responsável pelo retardo dos tempos de pega dos blocos de concreto. NEVILLE (2000) comenta que, quando se usa sacarose como retardador de pega, as resistências do concreto às primeiras idades são acentuadamente reduzidas, mas, após 7 dias, nota-se um aumento da resistência de vários pontos percentuais quando comparada com a resistência sem retardador. Segundo o autor, isso provavelmente se deve ao fato de que uma pega retardada resulta em um gel de cimento hidratado mais compacto.

Já o efeito isolado da idade na resistência à compressão dos blocos de concreto é ilustrado na figura 31.

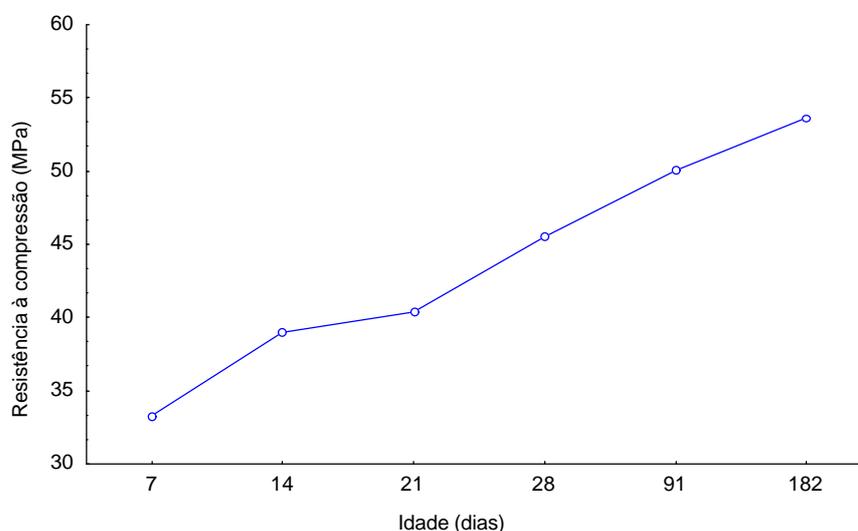


Figura 31 Efeito isolado da idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.

Verifica-se, na figura 31, que a resistência à compressão dos blocos cresceu significativamente ao longo do tempo. Este comportamento está de acordo com concretos utilizando materiais tradicionais na engenharia civil.

O efeito significativo da interação entre a idade e os teores do PAE, para a resistência à compressão, pode ser visto na figura 32.

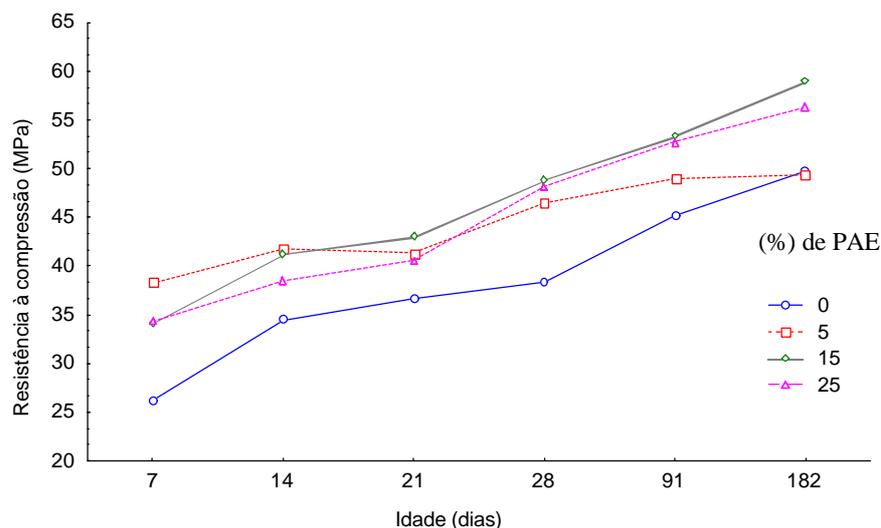


Figura 32 Efeito da interação entre o teor de PAE e idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.

Conforme ilustrado na figura 32, nas idades de 7 e 14 dias, os valores de resistência à compressão dos blocos contendo 5% do PAE foram superiores aos valores obtidos pelos outros blocos, inclusive os que não possuíam adição. Entretanto, dos 21 até os 182 dias, os valores de resistência para blocos com 15% e 25% do PAE, respectivamente, foram superiores. O aumento verificado para os valores de resistência dos blocos com 5% pode estar relacionado apenas ao efeito fíler, para baixas idades. Já para idades superiores, o PAE pode ter contribuído também quimicamente para o crescimento dos valores de resistência dos blocos com 15% e 25%.

6.2.1.1.2 Ensaios à abrasão

Os resultados do ensaio de desgaste à abrasão, ao longo do tempo, realizados conforme método CIENTEC para blocos de concretos de pavimentação contendo diferentes teores do PAE, estão indicados como valores de índice médio de desgaste à abrasão, conforme tabela 46.

Tabela 46 Valores do índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto contendo diferentes teores do PAE, ao longo do tempo.

Teor do PAE (%)	Índice de desgaste à abrasão (mm)							
	Idade (dias)							
	7		14		21		28	
	médio*	médio°	médio*	médio°	médio*	médio°	médio*	médio°
0	4,80	5,41	5,31	4,74	6,05	5,76	5,85	5,96
	6,02		4,16		5,46		6,06	
5	6,51	6,55	4,99	5,24	5,45	5,83	5,81	5,44
	6,59		5,49		6,20		5,07	
15	6,59	7,07	5,67	6,10	5,21	5,76	5,00	5,10
	7,55		6,54		6,30		5,20	
25	7,26	7,18	5,53	5,86	6,68	5,99	6,70	5,82
	7,11		6,19		5,30		4,95	

* - este é o índice de desgaste médio, medido em 5 pontos de uma amostra de bloco. Há dois valores para cada teor, pois realizou-se o ensaio em dois corpos-de-prova.

° - este índice de desgaste médio é a média aritmética entre os dois valores calculados no *.

PAE – pó de aciaria elétrica

Na figura 33 estão graficados os valores do índice médio de desgaste à abrasão, para blocos com distintos teores do PAE, ao longo do tempo.

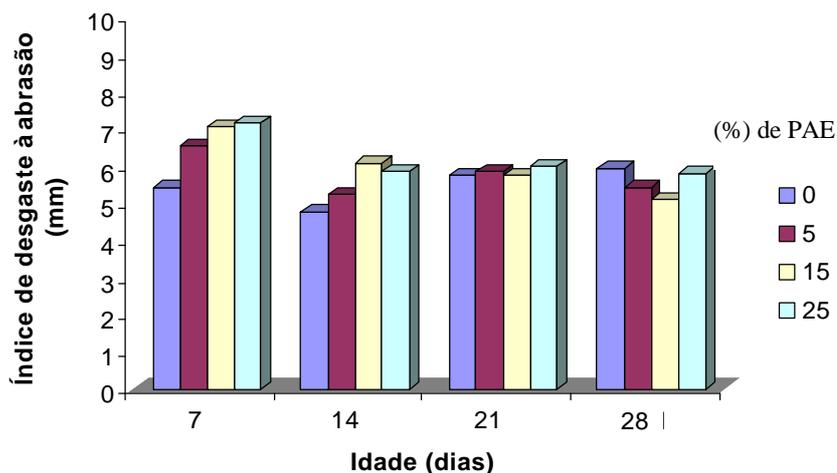


Figura 33 Índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação, com distintos teores do P.A.E, ao longo do tempo.

A tabela 47 sintetiza os resultados obtidos na análise de variância quanto ao índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto com diferentes teores do P.A.E, apresentando a influência da idade, do teor de pó utilizado, e a interação entre estas duas variáveis, ao nível de significância de 95%. Para a análise de variância foram utilizados dois fatores: teor do P.A.E e a idade (dias), com duas repetições.

Tabela 47 Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do P.A.E no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Idade	3	1,869	4,637	3,24	S
Teor de pó	3	0,837	2,077	3,24	NS
Idade x Teor	9	0,522	1,296	2,54	NS
Erro	16	0,4031			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

Com base nos resultados da tabela 47, obtidos na ANOVA, não foram observadas diferenças significativas nos valores do índice médio de desgaste à abrasão para o teor do P.A.E nem para a interação entre o teor e a idade, apesar de existir variabilidade nos resultados.

Isto porque foram realizadas um pequeno número de repetições do ensaio. Já o efeito isolado da idade apresentou influência significativa nos resultados de desgaste à abrasão dos blocos, cujo comportamento pode ser visto na figura 34.

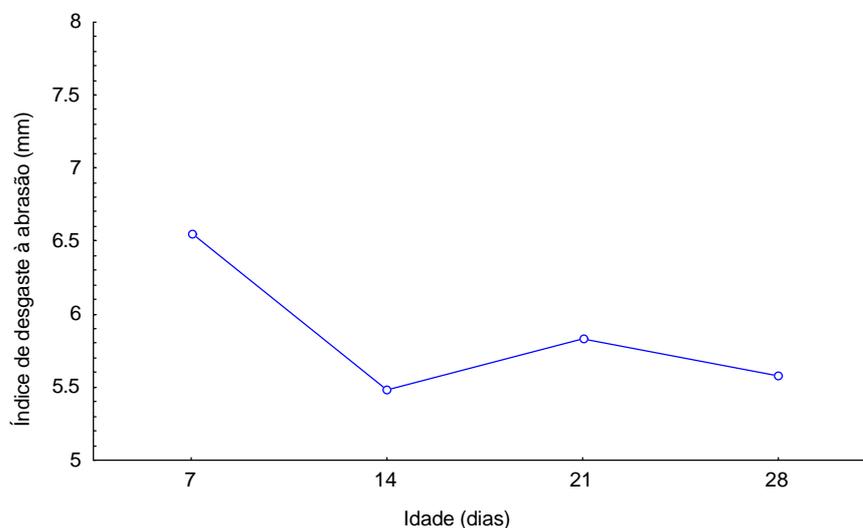


Figura 34 Efeito isolado da idade no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação.

Com exceção dos 21 dias, onde houve um aumento do desgaste médio à abrasão, o comportamento está de acordo com o comportamento da resistência à compressão (figura 31), pois com o aumento da idade há um aumento da resistência à compressão e uma diminuição do desgaste à abrasão.

6.2.1.2 Propriedades Físicas

As propriedades físicas determinadas dos blocos de concreto foram a absorção e massa específica, conforme NBR 9778 (ABNT, 1987). Para a realização destes ensaios, os blocos apresentavam idade de 28 dias.

6.2.1.2.1 Absorção após imersão

Na tabela 48, estão os resultados de absorção, obtidos após imersão em água à temperatura de 23 ± 2 °C, para blocos com diferentes teores do PAE.

Tabela 48 Resultados da absorção dos blocos de concreto para pavimentação, contendo adições do PAE, após imersão em água (%).

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Absorção após imersão (%)	Média aritmética (%)
0	4,36	4,52
	4,22	
	5,00	
5	4,38	4,43
	4,47	
	4,46	
15	4,31	4,34
	4,02	
	4,69	
25	4,25	4,21
	4,20	
	4,19	

Em análise estatística com ANOVA, observou-se que a adição de PAE não apresentou diferenças significativas nos valores de absorção dos blocos de concreto, conforme tabela 49.

Tabela 49 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na absorção por imersão em água.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	0,5521	0,7626	4,07	NS
Erro	8	0,0723			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

6.2.1.2.2 Massa específica

a) Massa específica seca

Na tabela 50, podem ser visualizados os resultados obtidos no ensaio para determinação da massa específica seca dos blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores do PAE.

Tabela 50 Resultados da determinação da massa específica seca dos blocos de concreto para pavimentação.

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Massa específica seca (kg/dm ³)	Média aritmética (%)
0	2,22	2,22
	2,23	
5	2,30	2,29
	2,24	
	2,31	
15	2,36	2,36
	2,35	
	2,36	
25	2,37	2,36
	2,33	
	2,37	

Na análise estatística com a ANOVA, apresentada na tabela 51, observaram-se diferenças significativas nos resultados da massa específica seca em relação ao teor do PAE adicionado.

Tabela 51 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica seca.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	0,0091	11,2547	4,07	S
Erro	7	0,0081			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

O efeito isolado do acréscimo do teor do PAE na massa específica seca dos blocos de concreto está ilustrado na figura 35.

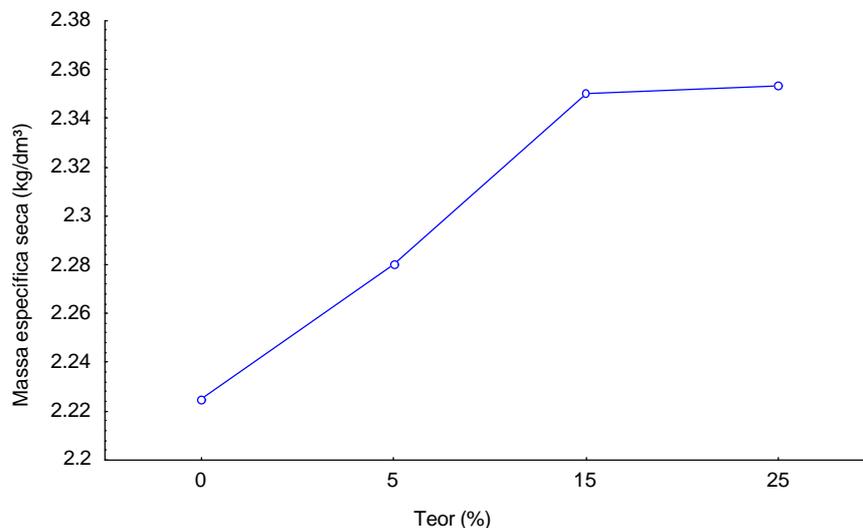


Figura 35 Efeito do acréscimo de teor do PAE nos valores da massa específica seca dos blocos de concreto.

Observa-se, na figura 35, que a massa específica seca dos blocos de concreto eleva-se com acréscimo do teor do PAE. Este comportamento está relacionado à massa específica do resíduo ($4,44 \text{ kg/dm}^3$) e ao efeito fíler que ele proporciona.

b) Massa específica após saturação em água

Na tabela 52, encontram-se os resultados obtidos no ensaio de determinação da massa específica dos blocos com diferentes teores do PAE após saturação em água.

Tabela 52 Resultados da massa específica, após saturação em água, dos blocos de concreto para pavimentação (kg/dm^3).

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Massa específica após saturação (kg/dm^3)	Média aritmética (%)
0	2,32	2,32
	2,33	
5	2,34	2,39
	2,42	
	2,40	
15	2,47	2,46
	2,44	
	2,47	
25	2,47	2,45
	2,42	
	2,47	

Na análise estatística ANOVA, apresentada na tabela 53, verificaram-se diferenças significativas nos valores da massa específica após imersão dos blocos de concreto com o acréscimo do PAE.

Tabela 53 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica após saturação.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	0,0098	10,1938	3,24	S
Erro	7	0,0009			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

O efeito isolado do acréscimo do teor do PAE na massa específica saturada dos blocos de concreto está ilustrado na figura 36.

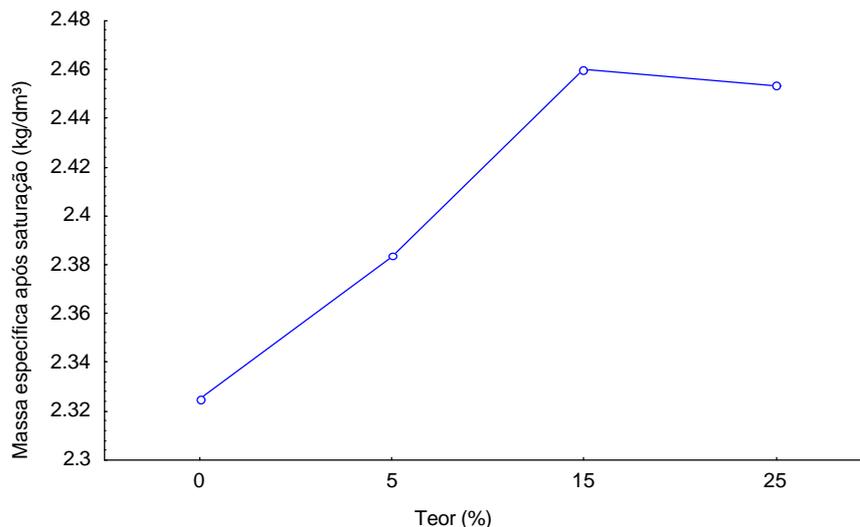


Figura 36 Efeito isolado do acréscimo de teor do PAE nos valores da massa específica saturada dos blocos de concreto.

Conforme verificado na massa específica seca, o acréscimo do teor do PAE teve efeito significativo na massa específica saturada dos blocos de concreto. Novamente, este efeito está relacionado à elevada massa específica do resíduo, 4,44 kg/dm³, que contribui significativamente para o acréscimo do valor da massa específica saturada dos blocos, além do efeito fíler contribuído pela adição do resíduo.

6.2.1.3 Avaliação da Durabilidade

Os ensaios de durabilidade dos blocos de concreto utilizando o PAE são necessários para procurar simular situações reais em que o produto poderá estar exposto, e assim, avaliar se o resíduo influenciará ou não no desempenho das peças de concreto.

6.2.1.3.1 Ataque por íons de cloretos

Na figura 37, verifica-se a evolução de ganho de massa para os blocos em um período de 180 dias. Cada ponto da curva corresponde à média aritmética de 3 corpos-de-prova. O ajuste da curva foi com uma função polinomial de ordem 6.

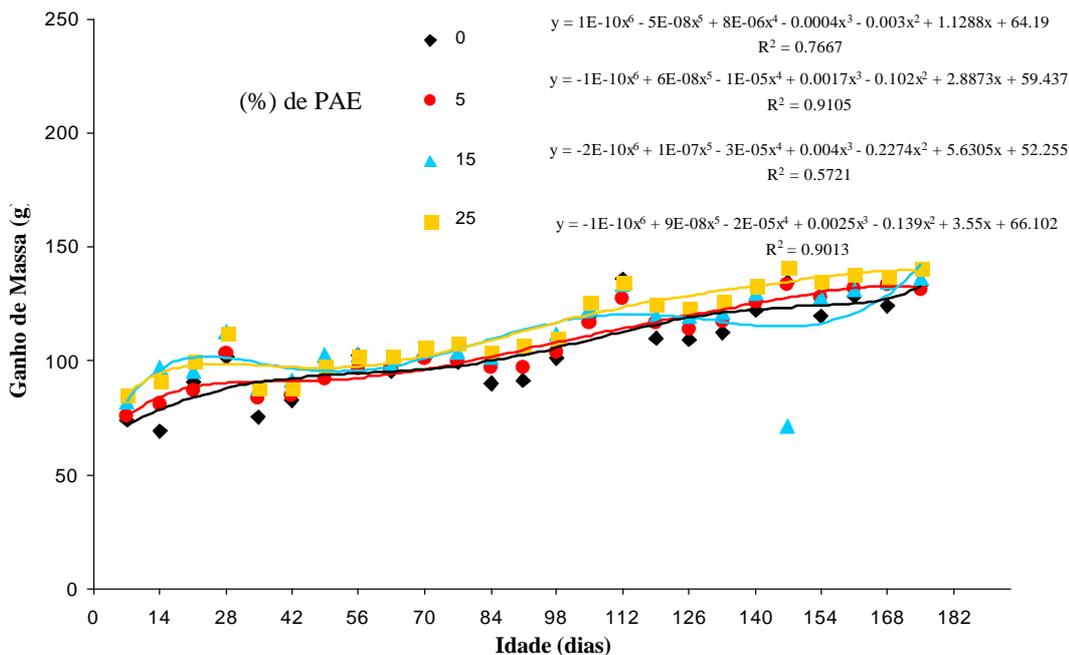


Figura 37 Evolução do ganho de massa para blocos de concreto, após ciclos de ataque por íons de cloreto, em um período de 180 dias.

Após os ciclos por ataque de cloreto, foi realizada uma análise visual para verificar alterações superficiais dos blocos, decorrentes da formação de produtos de corrosão. Entretanto, não foram verificadas alterações superficiais. Posteriormente ao ensaio visual, os blocos foram submetidos ao ensaio de compressão axial para avaliar sua resistência média, uma vez que para a realização deste ensaio foram necessários 3 corpos-de-prova, e para calcular a resistência característica dos blocos, conforme a NBR 9780 (ABNT, 1987), seriam necessários no mínimo 6. Os valores da resistência individual dos blocos, assim como a resistência média e o desvio padrão encontram-se na tabela 54.

Tabela 54 Valores de resistência à compressão individual, resistência média e desvio padrão para blocos com diferentes teores de PAE submetidos ao ensaio de ataque por íons cloretos.

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Resistência à compressão individual dos blocos (MPa)	Resistência média à compressão dos blocos (MPa)	Desvio padrão (%)
0	53,3	51,3	10,4
	40,1		
	60,6		
5	56,6	56,8	5,7
	51,2		
	62,6		
15	64,8	61,4	4,7
	63,5		
	56,0		
25	58,3	58,1	3,6
	54,4		
	61,6		

Em análise de variância, cujos resultados apresentam-se na tabela 55, utilizaram-se os valores de resistência à compressão determinados aos 182 dias para os blocos que não foram submetidos ao ensaio por ataque de cloretos (tabela 43, p. 90) e os valores de resistência à compressão determinados após o ensaio de ataque por cloretos (tabela 54).

Tabela 55 Análise de Variância (ANOVA) do efeito de os blocos serem ou não submetidos aos ciclos de ataque por cloretos, do teor de PAE e a interação entre estas duas variáveis

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Blocos submetidos ou não ao ataque de cloretos	1	86,928	4,079		NS
Teor de PAE	3	148,276	6,958		S
Interação entre as duas variáveis	3	15,044	0,706		NS
Erro	28	21,307			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

F_{calc}<F_{0,05}: NS

Com base nos resultados obtidos na ANOVA, tabela 55, pode-se constatar que o teor de PAE apresentou influência significativa na resistência à compressão dos blocos de concreto. Este comportamento está de acordo com o verificado na resistência à compressão,

conforme resultados na tabela 45, p. 92. Por outro lado, o efeito isolado da realização ou não do ensaio de ataque por cloretos e a interação entre esta variável e o teor de PAE não apresentaram diferenças significativas na resistência média à compressão.

A figura 38 ilustra o efeito isolado do teor de PAE na resistência à compressão após o ciclo por ataque de cloretos.

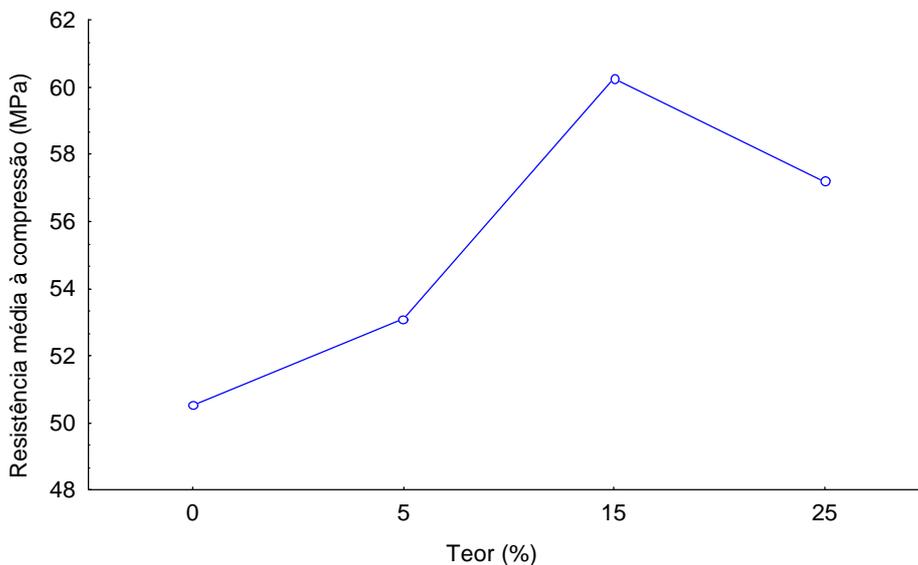


Figura 38 Efeito isolado do teor de PAE em blocos de concreto submetidos ao ensaio por ciclo de cloretos na resistência média à compressão

Nota-se, na figura 38, que, para os blocos contendo 15% de PAE, o comportamento da resistência à compressão apresentou melhor desempenho. Isto porque esta percentagem de adição, em relação à massa de cimento, foi a que proporcionou uma melhor compactação dos blocos, melhorando suas propriedades mecânicas.

6.2.1.3.2 Ensaio de Eflorescência

Em nenhum dos blocos ensaiados, com ou sem adição do PAE, verificou-se o aparecimento de eflorescências. Este ensaio foi realizado em amostras distintas, nas idades de 7 e 28 dias.

Na figura 39 observam-se os aspectos dos blocos de concreto para pavimentação isentos do PAE (0%) e os com distintos teores de adição do resíduo com idade de 7 dias, após o ensaio de eflorescência.

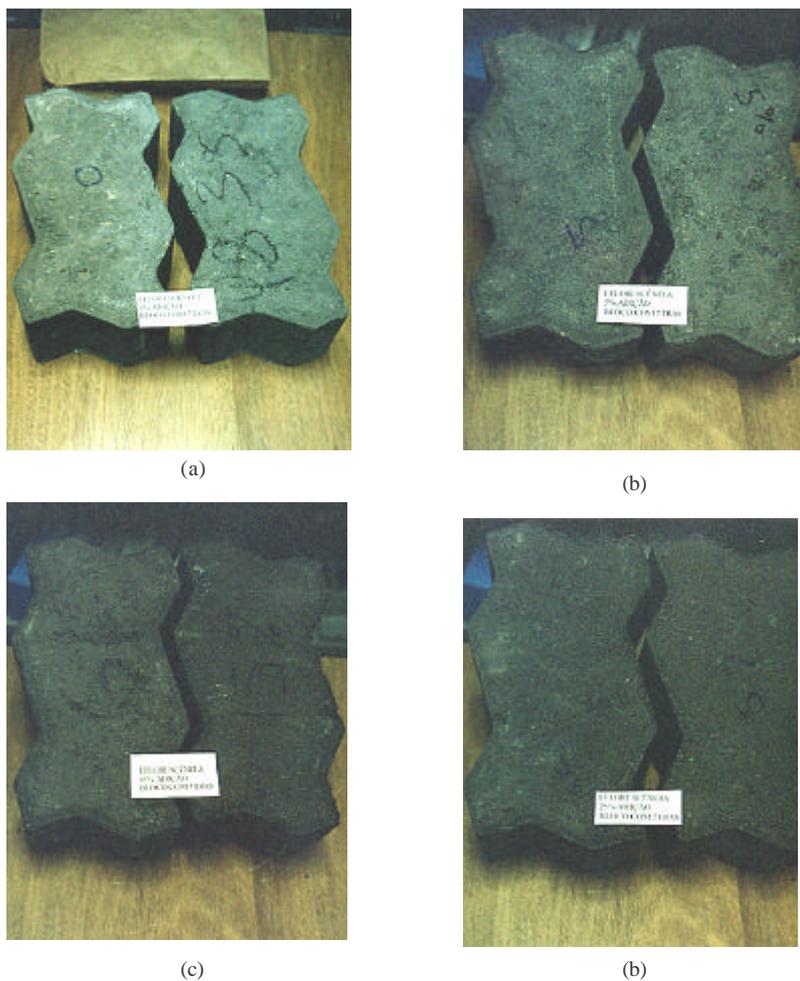


Figura 39 Aspecto dos blocos de concreto para pavimentação com idade de 7 dias, após o ensaio de efluorescência, para os blocos: **(a)** referência (0%); com teores de adição do PAE em relação à massa de cimento de: **(b)** 5% **(c)** 15% **(d)** 25% .

6.2.1.4 Avaliação Ambiental

Os ensaios ambientais nos produtos, ou seja, nos blocos de concreto, foram necessários pelo fato de o PAE utilizado ter sido classificado como um resíduo sólido Classe I - perigoso. Desta maneira, foi verificado se a matriz cimentante, proporcionando proteção física e ambiente alcalino, seria capaz de encapsular os metais pesados contidos no PAE.

6.2.1.4.1 Ensaio de lixiviação

Verifica-se, na tabela 56, que os valores das concentrações obtidas no ensaio de lixiviação, para amostras de blocos de concreto com distintos teores do PAE, não superaram os limites máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987) em nenhuma das idades analisadas. Com estes resultados, o produto, contendo o resíduo, não é considerado perigoso.

Estes resultados estão de acordo com PEREIRA et al. (2001), HAMILTON e SAMMES (1999), PERA et al. (1997), TAMÁS et al. (1992), que utilizaram diferentes metais perigosos em ambiente cimentante, e houve um encapsulamento destes metais, verificados através do ensaio de lixiviação. Conforme os autores, a pasta de cimento, por possuir um pH básico, favorece reações de transformação de metais solúveis em metais insolúveis.

Tabela 56 Lixiviação dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 5%, 15 e 25%, e blocos referência (0%), da primeira etapa do programa experimental.

Amostras	Teor (%) de adição do PAE em relação à massa de cimento																Limites máximos NBR 10004
	0				5				15				25				
Idade (dias)	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	
F mg/L*	2,10	1,80	2,60	2,60	2,90	2,50	2,80	2,10	3,40	3,10	3,80	4,20	4,30	4,20	4,20	4,10	150
Cd mg/L*	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	0,08	0,06	0,20	0,07	0,14	0,12	0,10	0,06	0,50
Pb mg/L*	0,22	<0,05	<0,05	<0,07	0,22	<0,05	0,06	0,07	0,53	0,14	0,33	0,36	<0,05	0,14	0,50	0,40	5,00
Cr mg/L*	0,11	0,03	0,09	0,17	0,15	0,10	0,10	0,21	0,22	0,11	0,13	0,24	0,20	0,17	0,17	0,24	5,00
Cr ⁺⁶ mg/L	0,06	0,03	0,02	0,07	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,01	0,12	0,20	0,17	0,17	0,11	NN
Ba mg/L	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	100
Ag mg/L	0,01	<0,01	0,03	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	5,00
Hg -µg/L*	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	<0,20	100

* Substância considerada tóxica

NN Não Normalizado

PAE- pó de aciaria elétrica

6.2.1.4.2 Ensaio de Solubilização

Os resultados das análises químicas dos extratos solubilizados das amostras de blocos de concreto contendo distintos teores do PAE, ao longo do tempo, encontram-se na tabela 57. As concentrações do alumínio e da dureza de carbonato de cálcio foram superiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987), tanto para os blocos que apresentaram em sua composição PAE, quanto para os isentos da adição do resíduo.

Em relação aos valores da concentração do alumínio, pode-se justificar pelo fato de o mesmo estar presente em argilas, material, este, utilizado como matéria-prima para o cimento.

Já para os valores de concentração da dureza de carbonato, provavelmente está associado ao fato de o cimento utilizado para a confecção dos blocos de pavimentação (CPZ-II) poder possuir até 10% de adição de CaCO_3 , conforme NBR 11578 (ABNT, 1991), o que justificaria a presença deste composto nos extratos solubilizados das amostras de blocos analisadas.

Da mesma forma que os blocos de referência, os com 5% de adição do PAE também obtiveram concentrações de alumínio e de dureza de carbonato superiores às permitidas pela norma, cujas explicações já foram apresentadas.

Para os blocos de pavimentação com 15% e 25% de adição, além dos parâmetros de dureza e alumínio já citados, os limites estabelecidos para as concentrações dos elementos cromo e chumbo foram ultrapassados. Entretanto, verifica-se, nos resultados, que há uma tendência ao encapsulamento, para ambos os metais, ao longo do tempo.

Conforme os valores de concentração obtidos no ensaio de solubilização, todos os blocos analisados até os 28 dias pertencem à classe II – não inertes. Na análise dos resultados, as amostras dos blocos com adição de 5%, assim como as amostras dos blocos referência não solubilizaram metais pesados. Conforme verificado neste trabalho, a adição de até 5% não apresentaria riscos ao meio ambiente. Do contrário, adições de 15% e 25% solubilizaram metais pesados. Apesar de haver uma tendência ao encapsulamento para estes teores, não devem ser utilizados pelo menos antes dos 28 dias.

Tabela 57 Solubilização dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 5%, 15 e 25%, e blocos referência (0%) da primeira etapa do programa experimental.

Amostras	Teor (%) de adição de PAE em relação à massa de cimento																Limites máximos NBR 10004
	0				5				15				25				
Idade (dias)	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	
Cu-mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,00
Zn-mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Fe-mg/L	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,30
Mn-mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
SO ₄ ⁻ -mg/L	13,00	22,00	66,00	132,00	91,00	52,00	42,00	136,00	155,0	86,00	94,00	151,00	228,0	92,00	164,0	226,0	400,00
Na-mg/L	33,00	35,00	32,00	5,00	47,00	47,00	50,00	44,00	69,00	79,00	89,00	72,00	82,00	70,00	91,00	57,00	200,00
Al-mg/L	<0,20	1,20	1,00	0,50	0,50	0,50	0,70	0,30	<0,20	0,70	0,70	0,30	0,50	0,70	1,00	0,50	0,20
F ⁻ -mg/L*	<0,02	<0,02	0,03	<0,02	0,50	0,72	0,04	0,03	0,63	0,39	0,22	0,26	0,81	0,35	0,28	0,05	1,50
Pb-mg/L*	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,13	<0,05	<0,05	<0,05	0,13	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
Cr-mg/L*	0,02	0,02	0,03	<0,02	0,04	0,03	<0,02	0,04	0,15	0,08	0,07	0,05	0,17	0,08	0,05	0,03	0,05
Cr ⁺⁶ -mg/L	0,02	0,02	0,03	0,02	<0,03	0,03	<0,02	0,03	0,11	0,08	0,07	0,05	0,13	0,08	0,05	0,03	NN
Ba-mg/L*	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	1,00
Ag-mg/L*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Cl ⁻ -mg/L*	1,10	0,72	0,71	0,92	9,90	7,80	7,00	8,30	30,00	32,00	36,00	28,00	61,00	44,00	41,00	17,00	250,00
Hg-μg/L*	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,90	<0,10	<0,10	1,00
NNO ₃ -mg/L	0,20	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	10,00
Dureza mg CaCO ₃ /L	308,00	182,00	871,00	1036,0	1055,0	964,00	679,00	536,00	833,00	365,00	897,00	787,00	478,00	666,0	933,0	516,0	500,00
CN-mg/L*	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,10
Cd-mg/L *	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05

NN Não Normalizado

PAE- pó de aciaria elétrica

Substância considerada tóxica

6.2.2 Segunda etapa do programa experimental

Os blocos confeccionados na segunda etapa (deste programa experimental) tiveram os mesmos teores do PAE adotados na primeira etapa, ou seja, 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento e também blocos referência (0%). Entretanto, fixou-se o índice de umidade (medido por sensor de umidade localizado no equipamento misturador) e a proporção entre os agregados. Já que para cada teor de PAE tem-se um traço distinto, no texto desta etapa, cada traço será identificado pelo teor de PAE utilizado (0%, 5%, 15% e 25%), lembrando que os traços estão indicados no capítulo 5.

O índice de umidade da mistura de concreto, medido pelo sensor localizado no misturador, é determinado através de diferenças de potencial. Conforme observou-se na primeira etapa, a adição do PAE, para uma mesma relação a/c, elevou o índice de umidade da mistura. Na segunda etapa, procurou-se mantê-lo constante, diminuindo a relação a/c na medida em que se elevou o teor. Este aumento pode estar relacionado a uma melhor condutividade da mistura, proporcionada pelo PAE, pois é rico em óxidos metálicos.

Os resultados dos ensaios realizados nesta etapa encontram-se descritos a seguir:

6.2.2.1 Ensaios mecânicos

Os ensaios utilizados para avaliação do desempenho mecânico foram a resistência à compressão axial e o desgaste à abrasão, os quais foram realizados nos blocos da primeira etapa.

6.2.2.1.1 Ensaios de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão nos blocos de concreto para pavimentação foram realizados nas idades de 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 91, 182 e 364 dias. A determinação da resistência característica nas idades de 35, 42, 56 e 364 dias foi realizada com vistas a determinar se o decréscimo dos valores da resistência verificados em idades superiores estava associado à variabilidade do ensaio ou se era resultante da ação do PAE.

Os valores, em MPa, da resistência individual à compressão, da resistência média(f_p), conforme procedimentos da NBR 9780 (ABNT, 1987) e do desvio padrão (s), para blocos de concreto para pavimentação com diferentes adições do PAE, ao longo do tempo, estão indicados na tabela 58.

Já os valores da resistência característica à compressão, determinados conforme NBR 9781 (ABNT, 1987), do desvio padrão, do consumo teórico de cimento/ m^3 (C), da relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto contendo diferentes adições do PAE, encontram-se na tabela 59.

Tabela 58 Evolução da resistência à compressão (f_p), para os blocos de concreto com distintas adições de PAE e para blocos referência (0%), assim como o desvio padrão (S), ao longo do tempo.

Teor do PAE (%)	Resistência à compressão individual dos blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores do PAE (MPa)									
	Idade de ruptura dos blocos de concreto (dias)									
	7	14	21	28	35	42	56	91	182	364
0	32,8	31,1	39,6	32,8	44,9	39,3	36,7	43,3	45,9	46,7
	28,1	34,1	36,7	35,9	39,0	37,5	35,3	40,7	44,1	47,6
	32,2	30,1	33,0	43,3	37,8	38,4	43,8	39,9	47,0	46,5
	31,6	37,9	30,5	33,8	36,2	45,5	36,5	40,4	46,6	46,7
	26,4	35,6	37,5	36,7	36,9	35,0	37,5	36,5	48,6	46,5
	27,0	37,8	36,1	39,3	37,3	36,2	39,5	39,3	49,5	46,3
fp	29,7	34,4	35,6	37,0	38,7	38,6	38,2	40,0	46,9	46,7
S	2,8	3,3	3,3	3,8	3,2	3,7	3,1	2,2	1,9	0,5
5	30,2	37,5	40,6	45,9	39,2	36,2	36,5	39,0	41,2	57,7
	26,4	42,6	37,2	37,3	43,9	42,9	37,3	38,7	42,2	57,2
	39,5	36,4	47,0	48,4	49,3	37,5	41,8	35,0	38,7	56,1
	39,0	44,3	36,9	36,9	49,8	31,3	39,0	34,1	47,5	49,0
	42,1	35,9	41,8	37,6	38,9	36,9	33,2	35,9	49,6	44,3
	29,9	38,1	37,8	37,0	38,5	40,6	35,9	38,2	45,2	43,0
fp	35,5	39,1	40,2	40,5	43,3	37,6	37,3	36,8	44,0	51,2
S	6,4	3,5	3,9	5,2	5,2	3,9	2,9	2,0	4,1	6,7
15	43,3	44,9	46,9	37,8	38,1	31,6	35,8	38,2	46,6	45,6
	38,2	44,6	47,5	36,9	50,0	49,5	47,0	37,5	44,1	52,1
	37,3	36,2	37,2	47,0	51,0	41,6	40,2	49,0	47,3	51,7
	33,9	36,7	36,9	38,2	39,3	39,9	34,5	43,0	48,6	52,3
	35,2	46,1	45,2	45,0	45,6	34,1	38,4	45,2	50,4	58,2
	34,4	42,1	48,4	38,5	37,8	47,2	39,0	36,2	47,3	49,8
fp	37,0	41,7	43,7	40,6	43,6	40,6	39,1	41,5	47,4	51,6
S	3,5	4,3	5,3	4,3	6,0	7,0	4,4	5,0	2,1	4,1
25	27,1	29,4	35,6	27,0	21,4	22,5	25,0	37,5	52,1	46,6
	29,0	27,3	30,7	35,0	22,4	28,2	29,9	37,3	41,8	50,7
	35,8	27,6	28,5	26,1	30,5	29,0	32,1	36,5	42,2	52,0
	27,3	27,4	29,1	24,4	32,2	28,8	30,7	39,2	44,9	48,7
	28,4	27,0	30,4	29,9	26,5	30,7	32,8	36,9	51,0	46,5
	27,0	27,1	28,2	33,2	30,2	30,1	36,5	35,9	42,9	44,9
fp	29,1	27,7	30,4	29,2	27,2	28,2	31,2	37,2	45,8	48,2
S	3,4	0,9	3,9	4,2	4,5	2,9	3,8	1,1	4,6	2,7

Tabela 59 Valores da resistência característica à compressão ($f_{pk} = f_p - t * s$), desvio padrão (s), consumo de cimento/m³ (C) e relação água/cimento (a/c) para blocos de concreto de pavimentação com e sem adição de PAE.

Teor do PAE (%)	Resistência característica à compressão (f_{pk}) (MPa)										C** (kg/dm ³)	a/c
	Idade de ruptura dos blocos de concreto (dias)											
	7	14	21	28	35	42	56	91	182	364		
0	27,0	31,4	32,6	33,4	35,8	35,3	35,4	38,0	45,2	46,3	374,0	0,42
s	2,8	3,3	3,3	3,8	3,2	3,7	3,1	2,2	1,9	0,5		
5	28,6	35,9	36,6	35,7	38,4	33,9	34,6	34,9	40,3	45,1	377,0	0,41
s	6,4	3,5	3,9	5,2	5,2	3,9	2,9	2,0	4,1	6,7		
15	33,8	37,8	38,8	36,6	38,1	34,2	35,1	36,9	45,5	47,9	379,0	0,40
s	3,5	4,3	5,3	4,3	6,0	7,0	4,4	5,0	2,1	4,1		
25	26,0	26,8	27,9	25,4	23,0	25,5	27,7	36,2	41,6	45,7	381,0	0,38
s	3,4	0,9	3,9	4,2	4,5	2,9	3,8	1,1	4,6	2,7		

* consumo de cimento teórico desprezando os vazios

Analisando os resultados obtidos para o desvio padrão, na tabela 59, nota-se que, na maior parte dos casos, ele se apresenta com maior valor para os blocos com adição do PAE do que para os blocos sem adição. Comportamento semelhante foi constatado nos resultados dos blocos da primeira etapa.

Os valores da resistência característica à compressão, ao longo do tempo, para os blocos contendo adições de PAE apresentam-se ilustrados na figura 40.

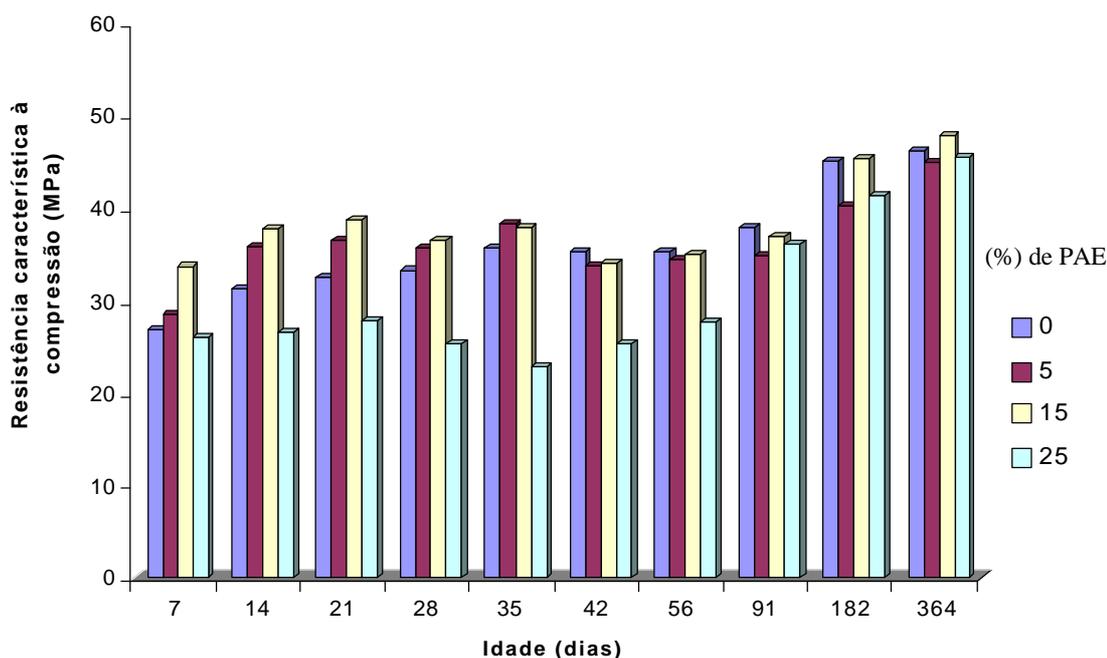


Figura 40 Determinação da resistência característica à compressão, ao longo do tempo, para blocos confeccionados com distintos teores do PAE.

A tabela 60 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto à resistência à compressão dos blocos de concreto, confeccionados com diferentes teores do PAE, mostrando os fatores que apresentaram diferenças significativas, ao nível de significância de 95%. Da mesma forma que na primeira etapa experimental, para a Segunda, na análise de variância foram utilizados dois fatores: teor do PAE e idade, com 6 repetições.

Tabela 60 Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, do teor do PAE e da interação entre esses dois fatores na resistência à compressão dos blocos de concreto.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Idade	8	626,343	40,075	2,01	S
Teor de pó	3	882,6367	56,473	2,66	S
Idade x Teor	24	47,544	3,042	1,58	S
Erro	200	15,629			

GDL: Grau de liberdade

S: Significativo

MQ: Média Quadrática

NS: Não Significativo

F_{cal}: Valor calculado de F

*Significância: F_{cal}>F_{0,05}: S

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{cal}<F_{0,05}: NS

Com base nos resultados obtidos na ANOVA (tabela 60), pode-se verificar que tanto a idade quanto o teor do PAE apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à compressão, assim como existe uma interação entre estas duas variáveis. Estes comportamentos estão ilustrados nas figuras 41 a 43.

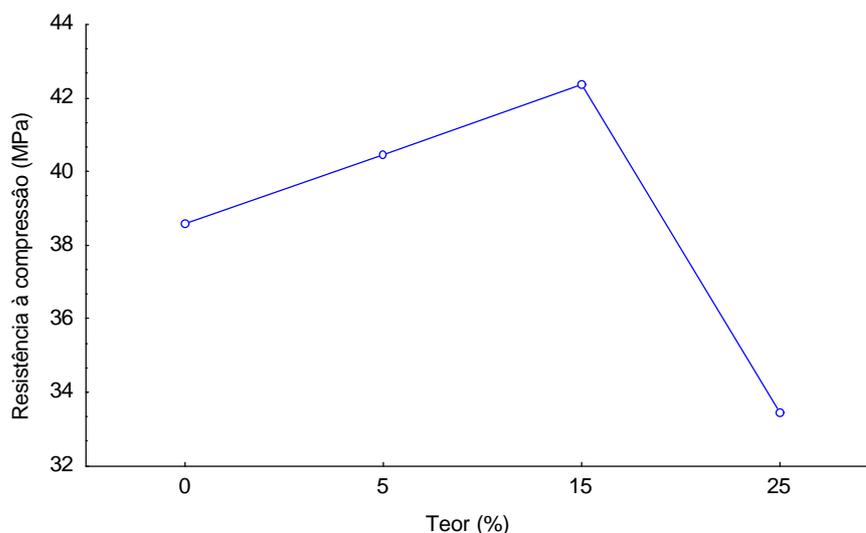


Figura 41 Efeito isolado do teor de PAE na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.

Na análise da figura 41, observa-se que o teor com melhor desempenho para a resistência à compressão foi o que contém 15 % do PAE. Cabe lembrar que a adição de 15% realizada na primeira etapa também apresentou o melhor desempenho. Entretanto, os valores de resistência para os blocos da primeira etapa apresentaram-se superiores aos da segunda etapa.

A figura 42 ilustra o comportamento da resistência à compressão dos blocos, contendo distintas adições de PAE, além dos blocos isentos do resíduo.

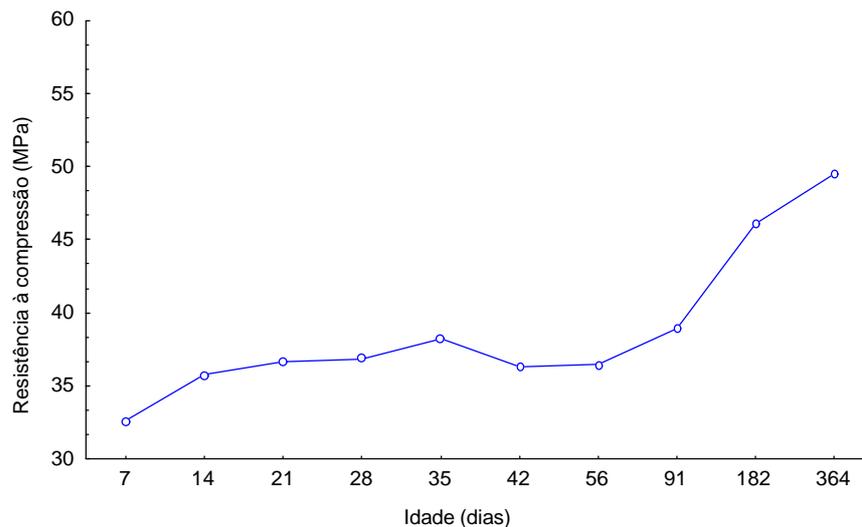


Figura 42 Efeito isolado da idade, na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos confeccionados com diferentes teores de PAE

Na análise da figura 42, nota-se que houve uma queda na resistência à compressão para os blocos entre as idades de 35 e 42 dias, mantendo-se constante entre os 42 e 56 dias, voltando a crescer até os 364 dias. Este efeito muito provavelmente está relacionado à variabilidade do ensaio ou a problemas associados à compactação decorrentes do posicionamento dos blocos na forma, como cita FRASSON JUNIOR (2000), pois, na primeira etapa do programa experimental, não foi observado decréscimo na resistência ao longo do tempo e pelo fato de a resistência continuar a crescer em idades mais avançadas. Além disso, os valores de desvio padrão foram superiores para blocos contendo o resíduo, em comparação aos valores dos sem adição. Cabe ressaltar que o PAE utilizado nas duas etapas experimentais, para confecção dos blocos, foi da mesma amostra homogeneizada para a realização de todos os ensaios realizados nesta pesquisa. Porém, não pode ser descartada a influência do cromo (contido no PAE), conforme observado por alguns autores que o utilizaram com produtos de cimento, entre eles OLMO et al. (2001), que constataram um pequeno decréscimo na resistência em pastas aos 56 dias; TASHIRO e OBA (1979), que verificaram variabilidade nos valores de resistência ao longo do tempo; WANG e VIPULANANDAN (2000), que verificaram que maiores teores de adição do metal em pastas de cimento influenciaram no decréscimo dos valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias, como apresentado no capítulo 4. Na figura 43, pode-se visualizar o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo para os blocos de concreto com distintos teores do PAE.

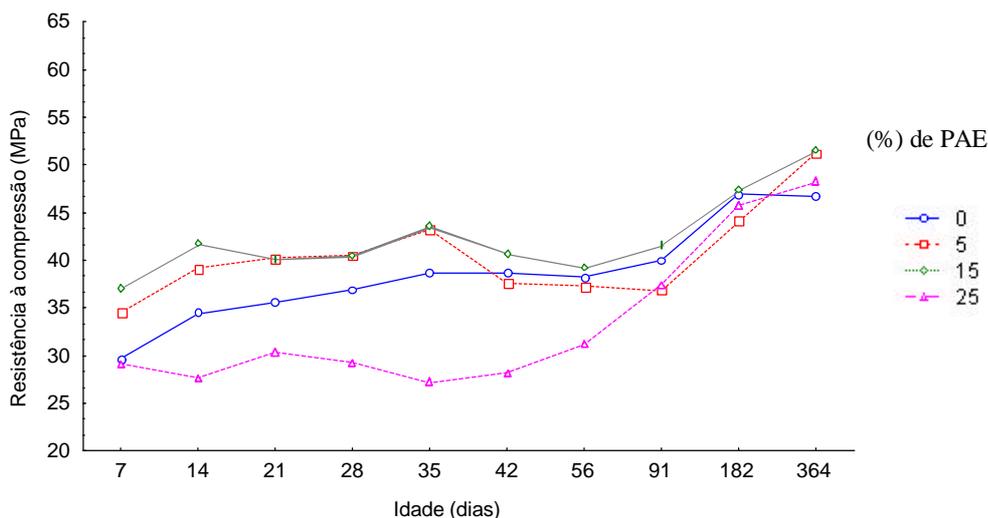


Figura 43 Efeito isolado da interação entre os teores do PAE e a idade na resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.

Na análise da figura 43, verifica-se que houve variabilidade no comportamento da resistência à compressão, ao longo do tempo, para os blocos com adição do PAE. Comportamento, este, que não ocorreu com os blocos isentos do resíduo. Os blocos com 25% do PAE obtiveram crescimento constante a partir dos 35 dias de idade; os com 15%, a partir dos 56 dias; e os com 5%, aos 91 dias. Nota-se, também, que após estas idades, até os 364 dias monitorados, os valores da resistência à compressão apresentaram crescimento. Os blocos sem adição foram os primeiros a serem moldados, seguidos dos blocos com teores de 5%, 15% e 25%, para evitar contaminação do PAE nos blocos referência.

6.2.2.1.2 Ensaios à abrasão

Na tabela 61, estão apresentados os resultados dos valores de índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto referência e dos blocos com distintos teores de PAE, ao longo do tempo.

Tabela 61 Valores do índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos com distintos teores do PAE, ao longo do tempo.

Teor do PAE (%)	Índice de desgaste à abrasão (mm)							
	Idade (dias)							
	7		14		21		28	
	médio*	médio°	médio*	médio°	médio*	médio°	médio*	médio°
0	6,98	6,83	7,02	6,60	5,55	5,66	6,09	6,48
	6,68		6,17		5,77		6,88	
5	6,97	7,07	7,28	7,00	6,44	6,10	6,48	6,46
	7,17		6,72		5,77		6,43	
15	7,40	7,06	8,52	8,71	6,69	6,68	7,14	7,28
	6,73		9,90		6,66		7,43	
25	9,60	9,36	8,23	8,27	5,62	6,78	8,80	8,99
	9,12		8,31		7,05		9,18	

* - este é o índice de desgaste médio, medido em 5 pontos de uma amostra de bloco. Há dois valores para cada teor, pois realizou-se o ensaio em dois corpos-de-prova.

° - este índice de desgaste médio é a média aritmética entre os dois valores calculados no *.

Na figura 44 estão os valores do índice médio de desgaste à abrasão, ao longo do tempo, dos blocos referência (0%) e dos blocos confeccionados com distintos teores do PAE.

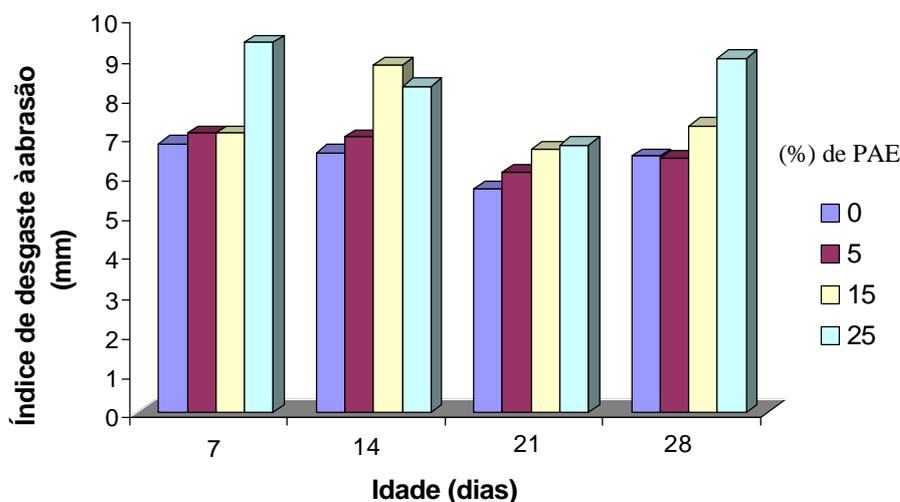


Figura 44 Índice médio de desgaste à abrasão de blocos de concreto para pavimentação referência (0%) e dos blocos com distintos teores do PAE ao longo do tempo.

A tabela 62 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto ao índice de desgaste à abrasão dos blocos de concreto referência (0%) e dos blocos com diferentes teores do PAE, mostrando os fatores que apresentaram diferenças significativas, ao nível de significância de 95%.

Tabela 62 Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor do PAE no índice de desgaste à abrasão dos blocos de concreto.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Idade	3	3,07	27,066	3,24	S
Teor de pó	3	6,202	54,674	3,24	S
Idade x Teor	9	0,678	5,980	2,54	S
Erro	16	0,11345			

GDL: Grau de liberdade

S: Significativo

MQ: Média Quadrática

NS: Não Significativo

F_{calc}: Valor calculado de F

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

Com base nos resultados obtidos na ANOVA, verificou-se que tanto a idade quanto teor do PAE apresentaram influência significativa nos resultados do índice médio de desgaste à abrasão, assim como existe uma interação entre estas duas variáveis. Estes comportamentos podem ser visualizados nas figura 45 a 47.

Na figura 45, nota-se o efeito isolado da adição do PAE no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto, sendo inversamente proporcional ao acréscimo do teor do PAE adicionado.

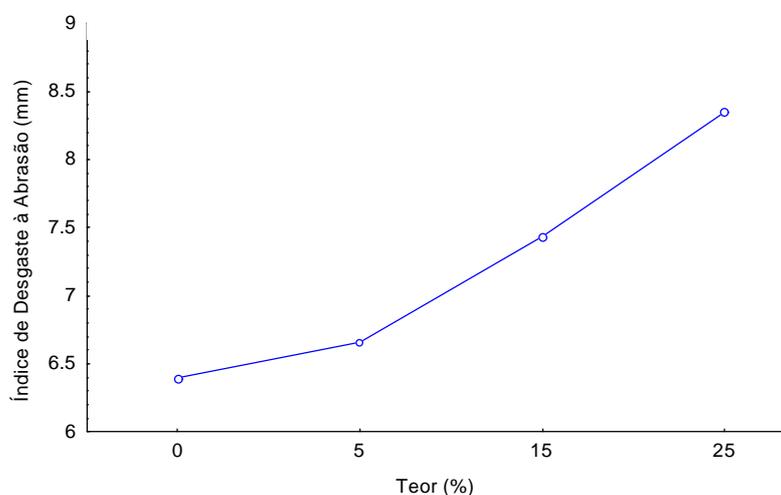


Figura 45 Efeito isolado do teor do PAE utilizado para a confecção dos blocos de concreto para pavimentação, no índice médio de desgaste à abrasão.

Conforme a figura 45, os maiores valores atingidos pelo índice médio de desgaste à abrasão foram obtidos pelos blocos contendo teor de 25% do PAE. Este efeito pode estar associado ao excesso de finos na massa de concreto, sendo também responsável pelo decréscimo de resistência à compressão, como foi verificado no comportamento da resistência

com o teor de PAE (figura 41, p.117). Cabe ressaltar que, apesar de não ser constatada a influência do teor de PAE no índice médio de desgaste nos blocos da primeira etapa, notou-se variabilidade nos resultados decorrentes do pequeno número de repetições que foram realizadas.

A figura 46 ilustra o isolado da idade dos blocos no índice médio de desgaste à abrasão.

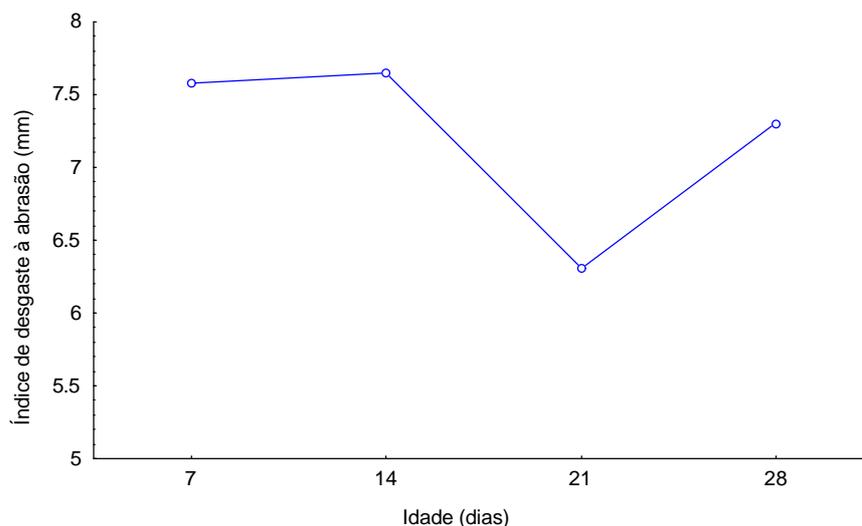


Figura 46 Efeito isolado da idade no índice médio de desgaste à abrasão dos blocos de concreto com diferentes teores do PAE e dos blocos referência

Nota-se, na figura 46, um comportamento diferente do esperado para o índice de desgaste à abrasão, pois não se observou decréscimo com o aumento da idade. Este comportamento ocorreu, inclusive, com os blocos isentos da adição do resíduo (tabela 61, p. 51). Supõem-se que estes valores sejam decorrentes da variabilidade de moldagem (posição dos blocos), variabilidade do ensaio de abrasão, decorrentes de um pequeno número de repetições realizadas, ou problemas de equipamento durante o ensaio.

O efeito da interação entre o teor do PAE utilizado e a idade dos blocos, no índice médio de desgaste à abrasão, é mostrado da figura 47.

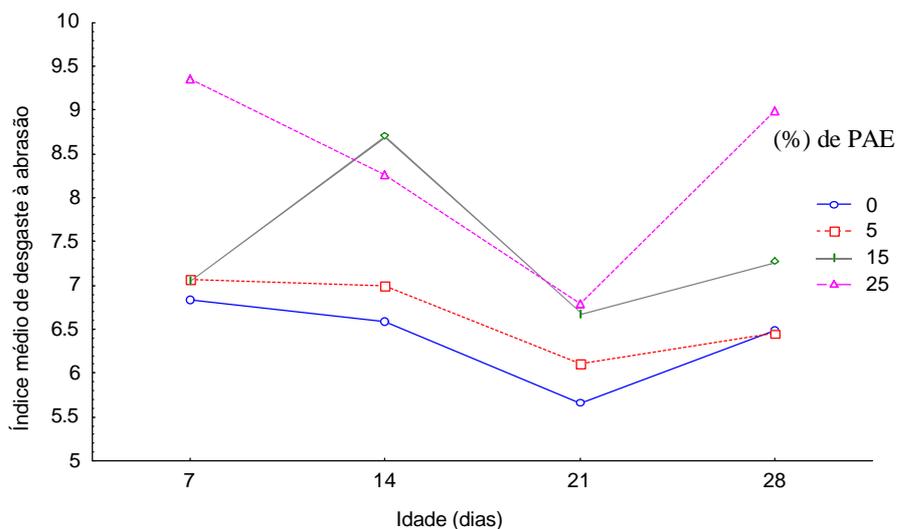


Figura 47 Efeito da interação entre o teor do PAE e a idade dos blocos de concreto para pavimentação, no índice médio de desgaste à abrasão.

Verifica-se, na figura 47, que entre as idades de 21 e 28 dias dos blocos de concreto, houve um aumento significativo do índice médio de desgaste à abrasão, inclusive para blocos sem adição do PAE. Este aumento provavelmente está relacionado à variabilidade do ensaio, conforme comentado anteriormente.

6.2.2.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas avaliadas foram a absorção e a massa específica dos blocos de concreto. Para a realização destes ensaios, os blocos apresentavam idade de 28 dias.

6.2.2.2.1 Absorção após imersão

Na tabela 63, estão indicados os resultados obtidos com o ensaio de absorção após imersão em água à temperatura de 23 ± 2 °C para os blocos com diferentes teores de PAE utilizados.

Tabela 63 Resultados da absorção dos blocos de concreto de pavimentação com distintos teores do PAE e dos blocos referência (0%) após imersão em água (%).

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Absorção após imersão (%)	Média aritmética (%)
0	5,20	4,95
0	4,63	
0	5,02	
5	5,03	5,44
5	5,65	
5	5,64	
15	4,13	4,70
15	4,56	
15	5,39	
25	6,84	6,56
25	7,07	
25	5,76	

A análise estatística com a ANOVA, dos valores obtidos no ensaio de absorção após imersão dos blocos de concreto contendo diferentes teores do PAE, está sintetizada na tabela 64.

Tabela 64 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação para a absorção após imersão em água.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	2,039	7,3753	4,07	S
Erro	8	0,2765			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{cal}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{cal}>F_{0,05}: S

Verifica-se na tabela 64 que o teor do PAE adicionado apresentou influência significativa na absorção dos blocos de concreto. Este comportamento é apresentado na figura 48.

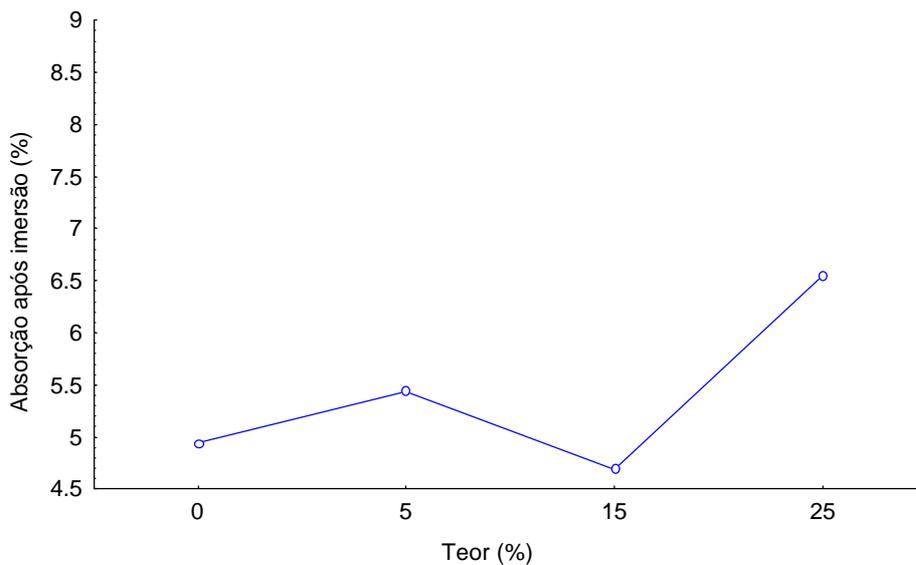


Figura 48 Efeito significativo do teor do PAE utilizado na absorção, após imersão em água, dos blocos de concreto para pavimentação.

Os blocos contendo 15% do PAE apresentaram um menor índice de absorção, correspondendo a uma melhor compactação na moldagem, bem como uma estrutura mais homogênea e menos permeável. Estes resultados estão de acordo com os obtidos no ensaio de resistência à compressão (figura 41 p. 117), em que os blocos com 15% do PAE apresentaram valores de resistência à compressão superiores aos demais.

6.2.2.2.2 Massa específica

a) Massa Específica seca

Os resultados obtidos no ensaio da massa específica seca dos blocos de concreto contendo diferentes teores do PAE encontram-se na tabela 65.

Tabela 65 Resultados da determinação da massa específica seca dos blocos de concreto para pavimentação contendo distintos teores do PAE.

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Massa específica seca (kg/dm ³)	Média aritmética (%)
0	2,13	2,18
	2,22	
	2,18	
5	2,13	2,10
	2,09	
	2,09	
15	2,28	2,21
	2,20	
	2,15	
25	2,10	2,11
	2,06	
	2,16	

Comparando-se os resultados obtidos neste ensaio para os blocos de concreto da primeira com os da segunda etapa, verificou-se que os blocos da primeira apresentaram valores superiores. Como os teores de PAE adotados foram os mesmos, pode-se dizer que o traço empregado na primeira etapa foi o mais adequado por proporcionar uma maior compactidade, maior resistência à compressão e abrasão e uma menor absorção.

Na tabela 66, são mostrados os resultados da análise estatística com a ANOVA para os valores obtidos no ensaio para determinação da massa específica seca.

Tabela 66 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica seca.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	0,0086	3,6539	4,07	NS
Erro	8	0,0023			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

b) Massa específica após saturação

Na tabela 67, observam-se os resultados obtidos no ensaio para determinação da massa específica saturada dos blocos de concreto contendo distintos teores de PAE.

Tabela 67 Resultados da massa específica, após saturação em água, dos blocos de concreto para pavimentação com distintos teores de PAE (kg/dm³).

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Massa específica após saturação (kg/dm ³)	Média aritmética (%)
0	2,24	2,29
	2,33	
	2,29	
5	2,24	2,22
	2,21	
	2,21	
15	2,37	2,31
	2,30	
	2,27	
25	2,24	2,25
	2,20	
	2,28	

A tabela 68, apresenta uma síntese dos resultados obtidos na análise estatística com ANOVA para os valores obtidos no ensaio da massa específica saturada.

Tabela 68 Análise de Variância (ANOVA) do teor do PAE adicionado em blocos de concreto para pavimentação na massa específica após saturação.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Teor de pó	3	0,0052	3,2104	4,07	NS
Erro	8	0,0016			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

F_{calc}<F_{0,05}: NS

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

Assim como na massa específica seca, a saturada não apresentou diferença significativa entre os teores utilizados para a confecção dos blocos de concreto.

6.2.2.3 Avaliação da durabilidade

Como nos blocos da primeira etapa, realizaram-se ensaios de durabilidade para avaliar se a mudança nos teores do PAE, através da alteração de porosidade dos blocos, influenciaria nas características do produto.

6.2.2.3.1 Ataque por íons de cloretos

Os procedimentos deste ensaio foram os mesmos apresentados no capítulo 5.

Na figura 49, está representada a evolução de ganho de massa para os blocos em um período de 180 dias. Cada ponto da curva corresponde à média aritmética de 3 blocos de concreto com diferentes traços adotados utilizando o PAE. O ajuste da curva foi através de uma polinomial de ordem 6.

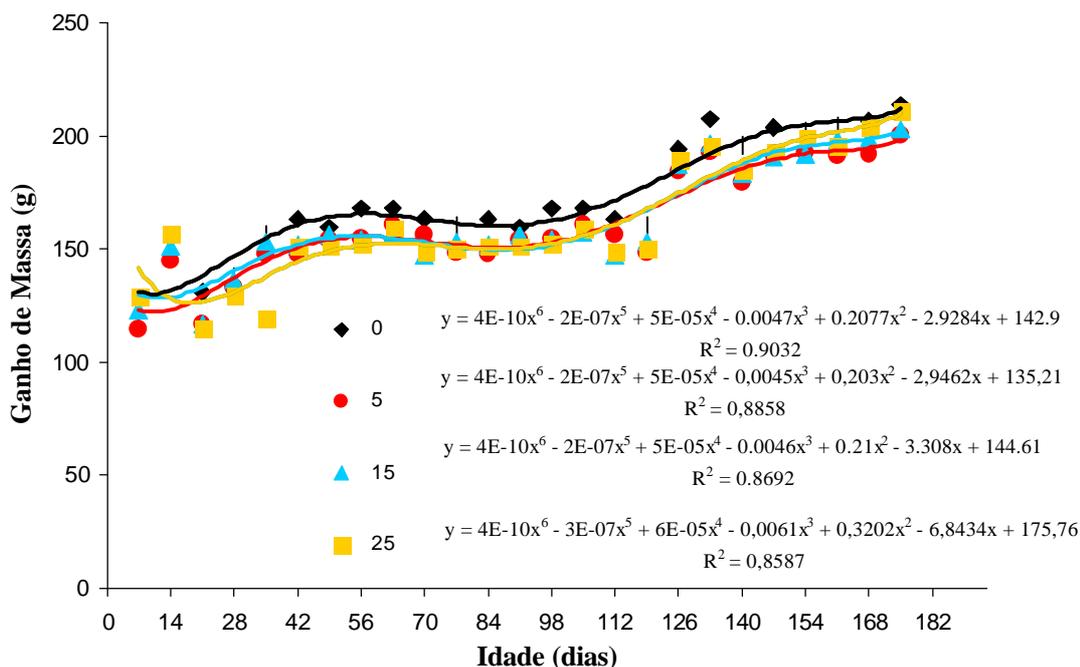


Figura 49 Evolução do ganho de massa para blocos de concreto com diferentes traços adotados utilizando o PAE, após ciclos de ataque por íons de cloretos, em um período de 180 dias.

Concluídos os ciclos de ataque de cloretos, realizou-se uma análise visual na superfície dos blocos que continham o resíduo para verificar a possível formação de produtos de corrosão. Não sendo constatada a formação destes produtos, os blocos foram submetidos

ao ensaio de resistência à compressão. Os valores da resistência individual dos blocos, assim como a resistência média e o desvio padrão, encontram-se na tabela 69.

Tabela 69 Valores de resistência à compressão individual, resistência média e desvio padrão para blocos referência (0%) e os blocos com diferentes teores de PAE submetidos ao ensaio de ataque por íons cloretos.

Teor do PAE em blocos de concreto (%)	Resistência à compressão individual dos blocos (MPa)	Resistência média à compressão dos blocos (MPa)	Desvio padrão (%)
0	37,6	44,8	6,54
	46,7		
	50,3		
5	56,1	51,9	4,59
	47,0		
	52,7		
15	55,0	54,3	5,98
	48,0		
	59,9		
25	58,7	53,5	6,76
	45,9		
	56,1		

Em análise de variância, cujos resultados apresentam-se na tabela 70, utilizaram-se os valores de resistência à compressão determinados aos 182 dias para os blocos que não foram submetidos ao ensaio por ataque de cloretos (tabela 58 p. 115) e os valores de resistência à compressão determinados após o ensaio de ataque por cloretos (tabela 69).

Tabela 70 Análise de Variância (ANOVA) do efeito de os blocos serem ou não submetidos aos ciclos de ataque por cloretos, do teor de PAE e a interação entre estas duas variáveis.

FATOR	GDL	MQ	F _{Calc}	F _{0,05}	Significância*
Blocos submetidos ou não ao ataque de cloretos	1	209.101	11,243		S
Teor de PAE	3	36.857	1,981		NS
Interação entre as duas variáveis	3	46.384	2,494		NS
Erro	28	18,597			

GDL: Grau de liberdade

MQ: Média Quadrática

F_{calc}: Valor calculado de F

F_{0,05}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S: Significativo

NS: Não Significativo

*Significância: F_{calc}>F_{0,05}: S

F_{calc}<F_{0,05}: NS

Com base nos resultados obtidos na ANOVA, tabela 70, pode-se constatar que os blocos de concreto que foram submetidos ao ensaio de cloretos apresentaram diferenças significativas em relação aos valores de resistência à compressão dos blocos que não foram submetidos ao ensaio de cloretos. Por outro lado, não houve influência do teor de PAE nem da interação entre esta variável e a realização ou não do ensaio de cloretos.

Na figura 50, observa-se o efeito isolado da realização (identificado com a letra “C”) ou não (identificado com a letra “S”) do ensaio de ataque por íons cloretos na resistência média à compressão (MPa).

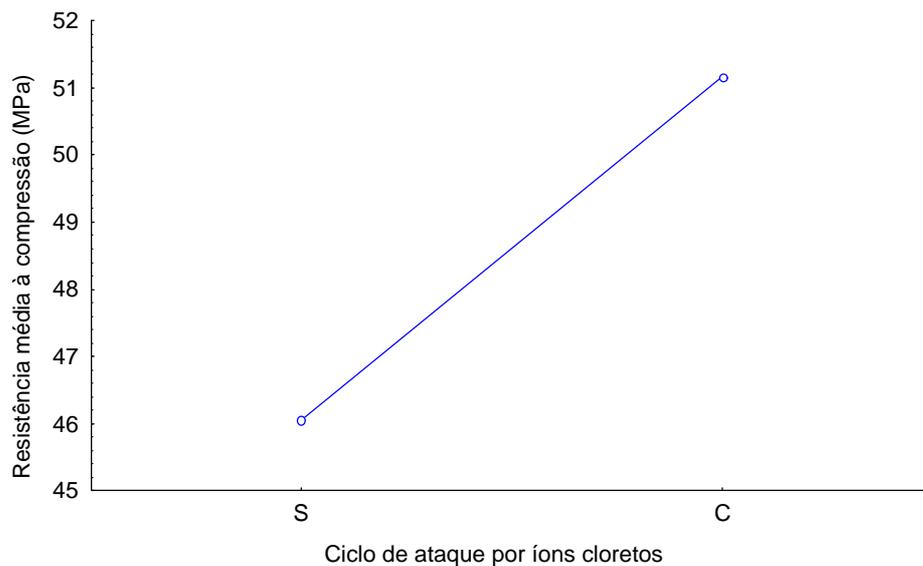


Figura 50 Efeito isolado dos blocos submetidos (identificado pela letra “C”) ou não (identificado pela letra “S”) aos ciclos por ataque de íons cloretos na resistência média à compressão (MPa).

Nota-se, na figura 50, que o comportamento da resistência à compressão apresentou melhor desempenho para os blocos que foram submetidos aos ciclos por ataque de íons cloretos (identificado pela letra “C”). Este efeito muito provavelmente está relacionado aos procedimentos que o ensaio proporcionou aos blocos, ou seja, os ciclos de imersão em solução de cloretos e a utilização do painel de lâmpadas (3000w) contribuíram para uma melhor cura, proporcionando uma maior resistência em relação aos blocos que não foram submetidos a esta condição. Porém, não pode ser descartada a hipótese de que íons cloretos tenham penetrado nos blocos e tenham reagido com produtos de hidratação do cimento, proporcionando um preenchimento dos vazios e, assim, contribuindo para o acréscimo da resistência, quando comparado aos valores dos blocos que não foram submetidos ao ensaio.

6.2.2.3.2 Ensaios de Eflorescência

Este ensaio foi realizado conforme a norma ASTM 67 –97. Foram realizados ensaios de eflorescência para os blocos de concreto com diferentes teores nas idades de 7 e 28 dias. Da mesma forma que nos blocos da primeira etapa, nos da segunda não foram constatadas eflorescências em nenhuma das idades analisadas.

Na figura 51 observa-se os aspectos dos blocos de concreto para pavimentação isentos do PAE (0%) e os com distintos teores de adição do resíduo com idade de 7 dias, após o ensaio de eflorescência.

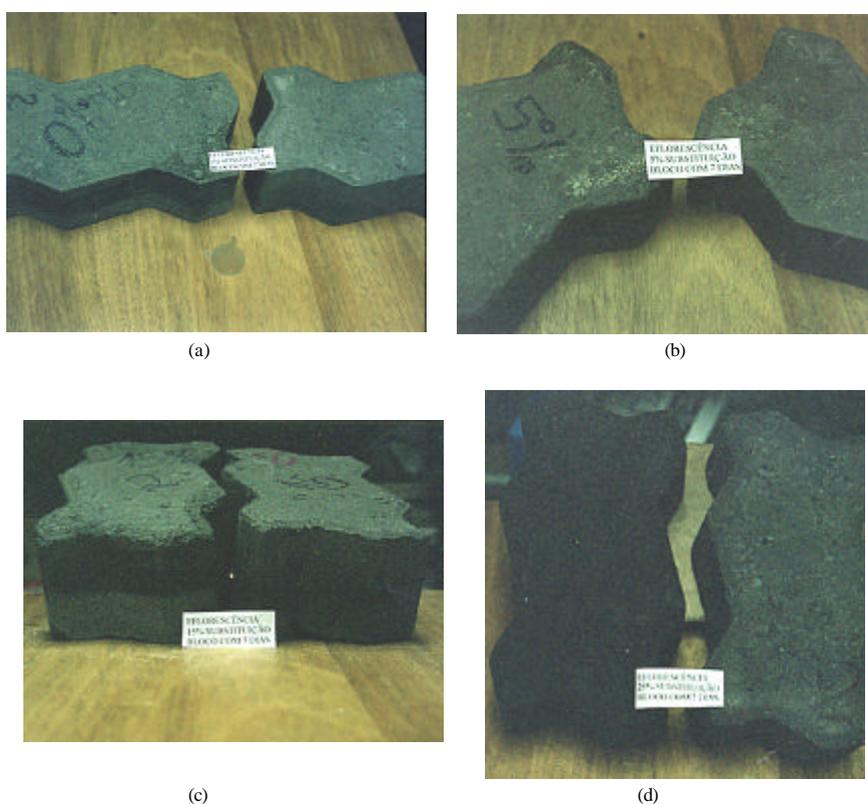


Figura 51 Aspecto dos blocos de concreto para pavimentação com idade de 7 dias, após o ensaio de eflorescência, para os blocos: **(a)** referência (0%); teores de adição do PAE em relação a massa de cimento de: **(b)** 5% **(c)** 15% **(d)** 25% .

6.2.2.4 Avaliação Ambiental

Os procedimentos para a realização deste ensaio foram os mesmos citados no item 4.2.2.2.

6.2.2.4.1 Ensaio de Lixiviação

Os ensaios de lixiviação seguiram os procedimentos da NBR 10005 (ABNT, 1987) e foram monitorados para idades de 7, 14, 21 e 28 dias para as amostras dos blocos de concreto referência (0%) e dos blocos de concretos com distintos teores de PAE. Os resultados deste ensaio, bem como as concentrações máximas permitidas pela norma, estão apresentadas na tabela 71.

Analisando os resultados na tabela 71, não foram ultrapassadas em nenhuma das idades analisadas as concentrações máximas da norma, ou seja, o produto contendo PAE não é perigoso.

Tabela 71 Lixiviação dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 5%, 15 e 25%, e blocos referência (0%), da segunda etapa do programa experimental

Amostras	Teor (%) do PAE em relação à massa de cimento																Limites máximos NBR 10004
	0				5				15				25				
Idade (dias)	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	
F mg/L*	3,70	2,70	3,00	2,80	3,70	2,70	3,00	2,60	3,8	3,50	4,00	4,10	4,50	4,10	5,10	4,80	150
Cd mg/L*	0,02	0,03	0,10	0,03	0,02	0,03	0,07	0,03	0,07	0,10	0,19	0,07	0,14	0,24	0,41	0,16	0,50
Pb mg/L*	0,18	0,11	0,08	0,11	0,18	0,11	0,11	0,07	0,36	0,26	0,44	0,33	0,50	0,24	0,52	0,26	5,00
Cr mg/L*	0,10	0,28	0,14	0,21	0,10	0,24	0,13	0,21	0,18	0,15	0,16	0,30	0,22	0,24	0,21	0,43	5,00
Cr ⁺⁶ mg/L	0,07	0,12	0,14	0,12	0,06	0,12	0,12	0,11	0,18	0,15	0,16	0,18	0,22	0,24	0,21	0,20	NN
Ba mg/L	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	100
Ag mg/L	0,02	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,01	0,02	<0,01	5,00
Hg -µg/L*	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	100

* Substância considerada tóxica

NN Não Normalizado

6.2.2.4.2 Ensaio de Solubilização

A tabela 72 apresenta os resultados do ensaio de solubilização para os blocos com diferentes teores contendo PAE, nas idades indicadas.

Da mesma forma que ocorreu nos blocos da primeira moldagem, as concentrações de alumínio e dureza de carbonato ficaram acima das permitidas pela norma para todos os traços analisados. Lembrando que, para o alumínio, o mesmo se encontra na argila utilizada para fabricação do cimento, e a dureza, devido ao cimento Portland composto –CPII-Z utilizado e conforme a NBR 11578 (ABNT, 1991) pode possuir até 10% de adição de CaCO_3 .

Para os blocos de pavimentação com traço contendo 25% de PAE, além de a dureza e o alumínio terem ultrapassado os limites estabelecidos, as concentrações de SO_4 e Cr também ficaram acima das permitidas pela norma. Para o sulfato, observa-se a tendência ao encapsulamento, pois, aos 21 dias, a concentração encontra-se abaixo da permitida. Entretanto, para as concentrações de Cr não se observa a tendência ao encapsulamento, pois, mesmo aos 28 dias, apresentam-se acima da máxima permitida pela norma.

Nesta segunda etapa, o elemento Pb, que havia ultrapassado o limite na primeira moldagem, não foi ultrapassado em nenhum dos teores analisados até os 28 dias.

A classificação dos blocos de concreto estudados, da mesma maneira que os da primeira etapa, pertencem à classe II – não inerte. Na análise dos resultados das amostras dos blocos com adição de 5%, assim como os referência (0%), não solubilizaram metais pesados. Do contrário, adições de 15% e 25% solubilizaram metais pesados.

Tabela 72 Solubilização dos extratos das amostras dos blocos contendo adições do PAE em teores de 5%, 15 e 25%, e blocos referência (0%), da segunda etapa do programa experimental

Amostras	Teor (%) do PAE em relação à massa de cimento																Limites máximos NBR 10004
	0				5				15				25				
Idade (dias)	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	7	14	21	28	
Cu-mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,00
Zn-mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Fe-mg/L	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,30
Mn-mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
SO ₄ ⁻ -mg/L	140,00	77,00	8,20	15,00	190,00	283,00	13,00	24,00	361,00	38,00	18,00	17,00	484,00	427,00	33,00	45,00	400,00
Na-mg/L	44,00	50,00	28,00	37,00	50,00	55,00	34,00	33,00	76,00	72,00	39,00	42,00	103,00	104,00	53,00	56,00	200,00
Al-mg/L	0,50	0,30	<0,20	<0,20	0,50	0,30	<0,20	<0,20	0,30	0,80	<0,20	<0,20	<0,20	0,50	<0,20	<0,20	0,20
F ⁻ -mg/L*	0,09	0,08	0,08	0,18	0,03	0,09	0,07	0,14	0,25	0,11	0,35	0,40	0,52	0,54	0,54	0,63	1,50
Pb-mg/L*	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
Cr-mg/L*	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,13	0,12	0,10	0,11	0,05
Cr ⁺⁶ -mg/L	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,13	0,12	0,10	0,11	NN
Ba-mg/L*	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	1,00
Ag-mg/L*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Cl ⁻ -mg/L*	5,20	5,70	7,60	12,00	6,40	7,10	7,00	9,50	28,00	27,00	28,00	28,00	89,00	80,00	78,00	80,00	250,00
Hg-µg/L*	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,00
NNO ₃ -mg/L	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	10,00
Dureza mg CaCO ₃ /L	839,00	830,00	390,00	555,00	667,00	975,00	547,00	700,00	796,00	622,00	652,00	639,00	941,00	954,00	887,00	964,00	500,00
CN-mg/L*	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,10
Cd-mg/L*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05

* Substância considerada tóxica

NN – Não Normalizado

6.2.3 Considerações em relação aos resultados obtidos nas duas etapas de moldagens com blocos de concreto referência (0%) e confeccionados com teores de 5%, 15% e 25% do PAE.

Do ponto de vista mecânico, constatou-se que, independente do traço utilizado, o teor do PAE em relação à massa de cimento, que proporcionou um melhor desempenho mecânico, entre os estudados neste trabalho (5%, 15% e 25%), foi o de 15%.

Além disso, os blocos moldados na primeira etapa do programa experimental obtiveram valores de resistência à compressão axial superiores aos valores encontrados na segunda etapa. Da mesma forma, observou-se que os valores das massas específicas para os blocos da primeira etapa, independente do teor do PAE adicionado, foram superiores aos valores dos blocos da segunda etapa. Isto se deve a uma melhor compactação obtida pelos blocos na primeira etapa, proporcionando, desta forma, um melhor desempenho mecânico. Cabe lembrar que, em ambas as etapas, os blocos contendo o PAE adquiriram valores de desvio padrão na resistência à compressão superiores aos blocos isentos do resíduo.

Já para os ensaios ambientais, notou-se que, para as amostras de blocos da primeira etapa, houve uma tendência ao encapsulamento dos metais pesados contidos no resíduo, assim como o Pb e o Cr até a idade de 28 dias. Nos blocos da segunda etapa, a concentração do elemento Pb não ultrapassou a máxima permitida pela NBR 10004 (ABNT, 1987) em nenhuma das idades analisadas. Isto provavelmente está relacionado ao maior consumo de cimento em relação aos blocos da primeira etapa, contribuindo, desta maneira, para um melhor encapsulamento deste elemento. Porém, este maior consumo contribuiu para que as concentrações de pureza de CaCO_3 ficassem acima da NBR 10004 (ABNT, 1987) em maior número de amostras analisadas quando comparadas às amostras analisadas na primeira etapa.

Desta forma, conclui-se que, com uma otimização do traço e um acompanhamento ambiental em idades superiores aos 28 dias, o PAE poderá ser utilizado como adição a produtos pré-moldados. Entretanto, a sua utilização é mais viável em empresas de menor porte, que utilizam a desforma manual, pois o PAE influencia no retardo dos tempos de pega, ou que possuam lugar para estocar os blocos, pois os mesmos só poderão ser liberados para a comercialização após constatado que o produto seja classificado como Classe I – inerte.

7 CONCLUSÕES

As conclusões, que aqui se apresentam, referem-se aos materiais utilizados, aos ensaios, técnicas e equipamentos empregados durante a realização desta pesquisa.

A seguir, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

7.1 PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA (PAE)

O PAE foi caracterizado como pertencente à classe I – resíduo sólido perigoso, pois, realizado o ensaio de lixiviação, elementos como o Cd e o Pb ficaram acima das concentrações máximas permitidas pela NBR 10004 (ABNT, 1987).

Como o resíduo foi classificado como perigoso, a sua disposição requer cuidados especiais para evitar a contaminação do meio ambiente.

7.2 PASTAS DE CIMENTO COM ADIÇÕES DE DIFERENTES TEORES DO PAE

Com o aumento do teor do PAE adicionado, foi necessária uma menor quantidade de água para obter um mesmo índice de pasta de consistência normal.

O teste de Vicat, conforme NBR 11581(ABNT, 1991) para a determinação dos tempos de pega em pastas contendo o resíduo siderúrgico, não foi adequado.

Utilizando-se o ensaio de determinação do calor de hidratação, conseguiu-se avaliar com maior precisão as reações de hidratação de pastas de cimento utilizando o PAE, constatando-se que maiores teores do resíduo resultaram em um maior tempo para o início das reações de hidratação do cimento.

Do ponto de vista mineralógico, além das 14 fases observadas nas pastas de referência, foram identificadas mais 5 novas fases nas pastas contendo o PAE. Houve fases onde picos que as identificam coincidiram com fases determinadas nas pastas referência, tais como os picos característicos de hidrozincato de cálcio que estavam sobrepostos a picos característicos de fases já encontradas nas pastas de referência, em uma mesma idade, como silicatos de potássio alumínio e óxido hidratado de cálcio alumínio. Isto significa que, quando

há fases onde os picos que as identificam coincidem, não se pode afirmar qual delas está presente ou se todas estão presentes.

Com o auxílio do MEV, acoplado com EDS, observaram-se partículas do PAE aparentemente inertes nas pastas de cimento com idade de 7 dias. Entretanto, aos 28 dias, nota-se a ocorrência de possíveis reações na superfície das partículas do PAE.

7.3 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO ADICIONADOS COM PAE

7.3.1 Moldagem dos blocos

Ao manter-se fixa a relação água/cimento e adicionados maiores teores do PAE na mistura para confecção dos blocos de concreto para pavimentação, houve também um acréscimo da umidade superficial visualizada no produto final, tendo, como consequência, a aderência dos blocos com 25% nas formas da máquina de vibro-prensa. Desta forma, para possibilitar a moldagem dos blocos, à medida que se aumenta o teor de PAE, deve-se reduzir a relação água/cimento.

O PAE, composto de diversos óxidos metálicos, pode contribuir para o aumento do índice de umidade da mistura de concreto, quando os sensores que realizam esta leitura a fazem por diferença de potencial. Isto porque o resíduo pode contribuir para uma melhor condutividade da mistura e, assim, interferir na leitura do sensor.

Os blocos que continham o resíduo também sofreram retardo de pega, sendo desmoldados 72 horas após a moldagem. Entretanto, os mesmos não apresentavam resistência suficiente para que pudessem ser desformados com auxílio de equipamento, pois desagregavam. Comportamento, este, contrário ao apresentado pelos blocos sem o resíduo, os quais foram desmoldados após 12 horas da moldagem com auxílio de equipamento.

7.3.2 Avaliação mecânica

O desvio padrão da resistência à compressão em blocos contendo o PAE foi superior ao dos blocos que não continham o resíduo, em ambas as moldagens.

Na primeira etapa do programa experimental, para blocos de concreto apresentando na sua composição o PAE, verificaram-se valores de resistência à compressão superiores aos dos blocos sem adição do resíduo, nas idades analisadas (exceção aos 182 dias). Verificaram-se, também, a influência significativa da idade, do teor do PAE adicionado e da interação entre os mesmos.

Para os valores de desgaste médio à abrasão, para blocos de concreto com ou sem adição do PAE, verificou-se influência significativa apenas na idade. Ou seja, a adição do resíduo nos blocos não influenciou no desgaste à abrasão.

Já para blocos da segunda etapa, tanto a resistência à compressão quanto o índice de desgaste à abrasão apresentaram diferenças significativas para o teor de PAE utilizado, a idade e a interação entre os mesmos. Observou-se que o comportamento apresentado pela resistência à compressão dos blocos contendo o resíduo mostrou-se com variabilidade ao longo do tempo. Além disso, os valores de resistência obtidos nesta etapa foram inferiores aos obtidos pelos blocos da primeira etapa. Da mesma forma, constatou-se um aumento dos valores do índice médio de desgaste à abrasão para os blocos da segunda etapa em relação aos dos blocos da primeira etapa.

Verificou-se, em ambas as etapas do programa experimental, que, entre os teores do PAE utilizados nos blocos de concreto para pavimentação (5%, 15% e 25%), além dos blocos isentos do resíduo, a adição de 15% em relação à massa de cimento foi a que apresentou o melhor desempenho quanto à resistência à compressão.

7.3.3 Durabilidade

Para os ensaios de durabilidade, os blocos, tanto da primeira quanto da segunda moldagens, não apresentaram eflorescência. Já no ensaio de ataque por cloretos, não foram observados produtos de corrosão ou desagregação superficial dos blocos. A resistência à compressão, determinada nos blocos com e sem PAE, após o ensaio de ataque por cloretos, para a primeira etapa, apresentou diferença significativa quanto ao teor de PAE utilizado. Já para os blocos da segunda etapa, houve influência significativa na resistência à compressão entre os blocos que foram submetidos ou não aos ciclos por ataque de cloretos.

7.3.4 Propriedades físicas dos blocos

Foram observadas diferenças significativas para os valores da absorção dos blocos de concreto em função do teor de PAE adicionado. Na primeira etapa, o acréscimo do teor ocasionou uma diminuição do valor da absorção. Este comportamento repete-se na segunda etapa apenas para blocos com 15% do resíduo. Isto se deve a uma melhor compactidade obtida na confecção do produto, e conseqüentemente, uma estrutura mais homogênea e menos permeável.

Para as massas específicas seca e saturada, também verificaram-se diferenças significativas quanto ao acréscimo do PAE. Isto se deve à massa específica do resíduo, de $4,44 \text{ kg/dm}^3$, que contribui para o acréscimo da massa específica do bloco.

7.3.5 Caracterização ambiental

Os resultados dos ensaios de lixiviação para as amostras dos blocos de concreto com e sem adição do PAE, tanto da primeira quanto da segunda etapa, em nenhuma das idades analisadas ultrapassaram as concentrações máximas da norma. Isto significa que os blocos contendo PAE não pertencem à classe I - produtos perigosos.

Já para os ensaios de solubilização, tanto o alumínio quanto a dureza de CaCO_3 ficaram acima das concentrações máximas permitidas pela NBR 10004 (ABNT, 1987), para todos os blocos analisados neste trabalho (blocos da primeira e segunda etapas), inclusive para as amostras de blocos com sem adição do PAE. Para as concentrações de Cr, tanto para amostras de blocos da primeira quanto da segunda etapas, constatou-se que, para adição de 5% de PAE não foi ultrapassada a concentração máxima permitida. Ao contrário do que foi observado, para adições de 15 e 25%, em ambas as etapas, notou-se que as concentrações do cromo ultrapassaram a máxima permitida. Entretanto, para blocos da primeira etapa, houve uma tendência ao encapsulamento, pois para adições de 15% aos 28 dias atingiu o limite máximo permitido (0,05 mg/L) e para adições de 25% aos 28 dias está abaixo da concentração máxima permitida. Ao contrário, nos blocos da segunda etapa, não foi constatada esta tendência de encapsulamento do cromo.

Quanto às concentrações do elemento chumbo, observou-se que, nas amostras dos blocos da segunda etapa, a concentração máxima permitida não foi ultrapassada em nenhuma

das idades analisadas. Já para amostras dos blocos da primeira etapa, constatou-se uma tendência ao encapsulamento do elemento chumbo, ao longo do tempo. Estes resultados indicam que a adição de 5% do PAE não oferece risco para o meio ambiente. Ao contrário, adições de 15% e 25% solubilizaram metais pesados, apesar de haver uma tendência ao encapsulamento ao longo do tempo. Todos os blocos analisados (0%, 5%, 15% e 25%) pertencem à classe II – produtos não inertes.

Desta forma, verificou-se que há a necessidade de novos estudos quanto ao comportamento do pó de aciaria em ambiente cimentante, principalmente quanto a avaliar o seu potencial em retardar as reações de hidratação.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na revisão bibliográfica realizada, nos resultados e observações verificados na etapa experimental, tanto em blocos de concreto quanto em pastas de cimento, sugere-se:

- Avaliar o potencial do pó de aciaria elétrica (PAE) como retardador de pega do cimento;
- verificar se o zinco realmente é o principal responsável pelo retardo de pega do cimento. Em caso afirmativo, procurar identificar se o composto que forma uma camada impermeável ao redor do grão de cimento é o hidróxido de zinco, o hidrozincato de cálcio ou algum outro composto;
- monitorar o comportamento da resistência à compressão, para corpos-de-prova adicionados com PAE ao longo do tempo. Para tanto, é necessário um maior número de amostras, pois foi verificado que os valores de desvio padrão para amostras com PAE foram superiores aos de amostras isentas do resíduo;
- realizar ensaios de solubilização em blocos de concreto utilizando 15% de PAE em relação à massa de cimento, em idades superiores aos 28 dias. Isto porque, dentre os valores estudados (5%, 15% e 25%), foi o que apresentou o melhor desempenho mecânico. Entretanto, apesar de haver uma tendência ao encapsulamento de metais pesados com o acréscimo da idade, até os 28 dias ainda estavam acima dos valores permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987);
- utilizar interações de soluções de metais pesados (zinco, chumbo, cádmio, cromo, entre outros) diferentes cimentos Portland, avaliando-se a influência de cada interação quanto aos tempos de pega do cimento, ao comportamento mecânico, ambiental e durabilidade. Poderia ser utilizado, também, o microscópio eletrônico de varredura, acoplado com EDS, para observar a composição mineralógica e microestrutural, como pastas e avaliar possíveis compostos formados em consequência das adições dos metais.

9 REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. P. 667.
- AL-ZAID, R. Z. et al. Investigation of potential use of electric - arc furnace dust (EAFD) in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 267-278, 1997.
- AMERICAN ASSOCIATION STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **C67 – 97: standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile**.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standart methods for examination of water and wastewater**. New York, 1985. P.287-288.
- ARLIGUIE, G. et al. Etude de l'effet retardateur du zinc sur l'hydratation de la pate de ciment Portland. **Cement and Concrete Research**, v. 12, p. 79-86, 1982.
- ARLIGUIE, G.; GRANDET, J. Etude de l'hydratation du ciment em presence de zinc influence de la teneur en gypse. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 3, p. 346-354, 1990_a
- ARLIGUIE, G.; GRANDET, J. Influence de la composition d'un ciment Portland sur son hydratation em presence de zinc. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 3, p. 517-524, 1990_b
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6474**: cimento portland e outros materiais em pó determinação da massa específica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: agregado para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecido – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9780**: peças de concreto para pavimentação determinação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação - especificação. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10005**: lixiviação de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10006**: solubilização de resíduos – procedimentos. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578**: cimento Portland composto– especificação. Rio de Janeiro, 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11580**: cimento Portland – determinação da água da pasta de consistência normal: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11581**: cimento Portland – determinação dos tempos de pega: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

- BARBOSA, M.T.G. – **Viabilidade do uso do pó oriundo do forno elétrico (resíduo siderúrgico) na construção civil**. Porto Alegre, 1993. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- BORDOLOI, D. et al. Influence of ZnO on clinkerization and properties of VSK cement. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 3, p. 329-333, 1998
- BRADASCHIA, C. **Siderurgia para não-siderurgistas**. São Paulo: ABM, v.1, 593p.
- BREHM_a, F.A. et al. **Caracterização química, térmica e estrutural de pós de aciaria elétrica**. XIII Seminário de fusão, refino e solidificação, 2001, Bahia.
- BREHM_b, F.A. **Avaliação mineralógica e microestrutural do efeito retardador do pó de aciaria elétrica em pastas de cimento**. Tese Doutorado, PPGEM, UFRGS – Em desenvolvimento.
- COLLEPARDI, M.; BALDINI, G.; PAURI, M. Tricalcium aluminate hydration in the presence of lime, gypsum or sodium sulfate. **Cement and Concrete Research**, v. 8, p. 571-580, 1978.
- CAMPOS, V.F. **Tecnologia de fabricação do aço**. 3 ed. Belo Horizonte, ABM – Associação Brasileira de Metais, 1985 v.1 – Fundamentos
- CHAN, Y. M.; AGAMUTHU, P.; MAHALINGAM, R. Solidification and stabilization of asbestos waste from an automobile brake manufacturing facility using cement. **Journal of Hazardous Materials**, v 77, p. 209-226, 2000.
- COCKE, D. L. et al. An XPS and SEM/EDS characterization of leaching effects on lead - and zinc – doped Portland cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. 30, p. 83-95, 1992.
- CÓDIGO Estadual do Meio Ambiente. Porto Alegre, Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, 2000, p107.
- COHEN, B. et al. Containment of chromium and zinc in ferrochromium flue dusts by cement-based solidification. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 36, n. 4, 1997.
- DAL MOLIN, D.C.C.; CREMONINI, R. **Dosagem de concretos**. Porto Alegre, CPGEC, UFRGS, 2001 [Notas de aula].
- DANIALI, S. Solidification/stabilization of heavy metals in latex modified Portland cement matrices. **Journal of Hazardous Materials**, v. 24, p. 225-230, 1990.
- DIET, J.N. et al. Behaviour of ordinary Portland cement during the stabilization/solidification of synthetic heavy metal sludge: macroscopic and microscopic aspects. **Waste Management**, v. 18, p. 17-24, 1998.
- DONALD, J.R.; PICKLES, C.A. Reduction of electric arc furnace dust with solid iron powder. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 35, n. 3, p. 255-267, 1996.
- ELY, A. **Economia do meio ambiente**, 4^a Ed. Edição da Secretaria de Coordenação e Planejamento do Estado, FEE/RS, Porto Alegre, 1990.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. RCRA Orientation Manual, 1990. Disponível em 11/2001: <http://www.epa.gov/epaoswer/general/orientat>
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Solid Waste and Emergency Response. RCRA: Reducing Risk from Waste. 1997. 46p. Disponível em 11/2001: <http://www.epa.gov>
- FILHO, A.F.S. **Utilização de escória de ferro-cromo para concreto**. Disponível como slides em 07/2002: <http://www.reciclar.ufba.br/palestras/seminario/freitas/freitas.htm>

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2000.

GEYER, R.M.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, 2001, 170 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GLASSER, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 52, p. 151-170, 1997.

GOLDSTEIN, J. I. et al. **Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis**. New York: Plenum Press, 1984.

HAMILTON, I. W.; SAMMES, N. M. Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar. **Cement and concrete research**, n. 29, 1999.

HECK, N. C; WEBER, J. V. V. Comportamento da poeira da aciaria elétrica em meio aquoso com diferentes pH's. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55. Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. p. 2685-2694.

HUBER J. C., PATISSON F., ROCABOIS P., BIRAT J. P., ABLITZER D., Somemeands to reduce emissions and improve the recovery of eletric arcfurnace dust by controlling the formation mechanisms. In: GLOBAL SYMPOSIUMON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 2 , 1999, p. 1483-1491.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS A **siderurgia em números**. 2002. Rio de Janeiro.

JACOMINO, V.M.F., et al. Usos da escória de alto-forno – Alternativas para a melhoria da qualidade ambiental. In: XXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. ABM. Santos – SP. **Anais...** P. 97-107. Nov-Dez. 2000.

JOHN, V.M. Pesquisa e desenvolvimento de mercados para resíduos. In: WORKSHOP “RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL”. **Anais...** São Paulo, ANTAC. 1996. P. 21-30.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição a metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102p. São Paulo, 2000. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.

JUVAS, K. J. Experiences to measure the workability no-slump concrete. In. INTERNATIONAL CONFERENCE “RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE” (Liverpool, march 1990) **proceedings**. Edited by P.F.G Barfill. Published by E. & F.N Span 1991. GB/Cambridge p. 259-269.

LEITE, M. B. et al. **Reciclagem e reaproveitamento de escórias e pós e aciaria elétrica**. Projeto Aços Finos Piratini, 2000.

LI, X. D. et al. Heavy Metal Speciation and Leaching Behaviors in Cement Based Solidified/Stabilized Waste Materials. **Journal of Hazardous Materials**, A82 p. 215-230, 2001.

LIN, C-K., et al. An NMR and xdr study of solidication/stabilization of chromium with Portland cement and β -c₂s. **Journal of Hazardous Materials**, v. 48, p. 137-147, 1996.

LMM – Laboratório de Medições Mecânicas (UFRGS) - “**SAD**” **Sistema de Aquisição de Dados**. Disponível em <http://www.ufrgs.br/lmm>. Acesso em junho/2000.

- LOUZADA, D.M. **Contribuição ao estudo do emprego das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados**. 85p. Rio de Janeiro. 1991. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Centro Tecnológico. Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação dos métodos de ensaio para a avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000. 135p . Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 2001. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MEDEIROS, J., et al. Blocos de concreto para alvenaria estrutural: Avaliação de parâmetros básicos para a produção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Brasil. **Proceedings – 5TH INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MANSORY FOR DEVELOPING COUTRIES – Florianópolis – Brazil – 1994**.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 1994.
- MOLLAH, M. Y. A.; et al. An FTIR, SEM and EDS investigation of solidification / stabilization of chromium using Portland cement Type V and Type IP. **Waste Management**, v. 30, p. 273-283, 1992.
- MOLLAH, M. Y. A. ; et al. The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metal in cement and pozzolanic material systems. **Waste Management**, v. 15, n. 2, p. 137-148, 1995.
- MONTGOMERY, D.G., et al. Instant- chilled steel slag aggregate in concrete – **Fracture Related Properties**. V. 22, p. 755-760, 1992.
- MONTOVANI M. C., et al. Caracterização de três tipos de poeiras geradas em forno elétricos a arco. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53., 1998, Belo Horizonte. Anais disponível em CD
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000, 192 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MURAT, M.; SORRENTINO, F. Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 377-385, 1996.
- MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. Porto Alegre, 2001, 264 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NANNI, F. L.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre, CPGEC, UFRGS, 1987. 228P. (Caderno Técnico).
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, São Paulo: PINI, 1997.
- OLMO, I. F., et al. Influence of Lead, Zinc, Iron (III) and Chromium (iii) oxides on the setting time and strength development of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1213-1219, 2001.
- PERA, J., et al. Design of a novel system allowing the selection of an adequate binder for solidification/stabilization of wastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 10, p. 1533-1542, 1997.

PEREIRA, E.A.C. Aspectos técnicos de gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: 25° SEMINÁRIO DE REDUÇÃO, MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA. Volta Redonda, RJ. **Anais...** p. 197-199, 1994.

PEREIRA C. F.; et al. Solidification/stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. B82, p. 183-195, 2001.

PESL, J. et al. Zinc management and recycling within the iron and steel industry : In: REWAS'99: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, p.1413-1422, San Sebastian, Espanha.1999

PISCIELLA, P., et al. The vitrification of various waste streams and glass characterization. In: REWAS'99, GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, p. 103-111, San Sebastian, Espanha. 1999.

POLLARD, S. J. T., et al. Organic Compounds in the cement-based stabilisation / solidification of hazardous mixed wastes – mechanistic and process considerations. **Journal of Hazardous Materials**, v. 28, p. 313-327, 1991.

RODRIGUES, P.P.F.- **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação** – prática recomendada – 2ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland: Agosto de 1995. (BT-103)

ROSA, M. A. – **Caracterização da incorporação da escória de aço inoxidável em materiais cerâmicos quanto a imobilização de cromo**. Porto Alegre, 2001. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS.

SANTHANAM, C. J., et al. – **Flue Gas Cleaning Disposal and Utilization**. Noyes Data Corporation, New Jersey – USA, 1981.

SHA, W., et al. Differential scanning calorimetry study of hydrated ground granulated blast – furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 327-329, 2001.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Consumo de cimento nacional por regiões e estados em 2001**. Disponível em: <http://www.snic.com.br>

SOBRINHO, P. J. N; TENÓRIO, J.A.S. Processos para o aproveitamento de poeiras geradas durante a fabricação do aço. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55., 2000, Rio de Janeiro.

STEGEMANN, J. A.; CÔTÉ, P. L. A Proposed Protocol For Evaluation Of Solidified Wastes. **The State of the Total Environment**, v. 178, p. 103-110, 1996.

STUART, C. Zinc Recycling Minimises Wastes : In: REWAS'99: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, p.1287-1296, San Sebastian, Espanha.1999

TAMÁS, F. D. et al. Effect of absorbents on the leachability of cement bonded electroplating wastes. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 399-404, 1992.

TANGO, C. E. S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais IPT – São Paulo, **Proceedings** – 5TH INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES – Florianópolis – Brazil – 1994.

TASHIRO, C. Hardening property of cement mortar adding heavy metal compound and solubility of heavy metal from hardened mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 7, p. 283-290, 1977.

TASHIRO, C.; OBA, J. The effects of Cr₂O₃, Cu (OH)₂, ZnO e PbO on the compressive strength and the hydrates of the hardened C₃A paste. **Cement and Concrete Research**, v. 9, p. 253-258, 1979

- TUMIDAJSKI, P. J.; THOMSON, M. L. Influence of CdO on the early hidratation of $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 385-389, 1995.
- VEMPATI, R. K., et al. Solidification/stabilization of toxic metal wastes using coke and coal combustion by-products. **Waste Management**, v. 15, n. 5/6, p. 433-440, 1995.
- VIZZONI, R. **Pavimento de concreto em vias urbanas**. Disponível em <http://www.abcp.org.br>. Acesso em 10 de outubro de 2002.
- VRANCKEN, K. C. et al. Petrography and Leaching : Complementary tools in assessing the environmental risks of secondary raw materials: In: REWAS`99: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TRATAMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, p.1373-1380, San Sebastian, Espanha.1999
- WANG, S.; VIPULANANDAN, C. Solidification/stabilization of Cr(VI) with cement leachability and XRD analyses. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 385-389, 2000.
- WAINWRIGHT, P. J., et al. The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete, **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 253-257, 2000.
- WILES, C. C. A Review of Solidification/Stabilization tecnology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 14, p. 5-21, 1987.
- YE, G.; VIKLUND-WHITE, C. The Utilization of Metallurgical Reactors for the Processing of Wastes: In: REWAS`99: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TRATAMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, p.213-221, San Sebastian, Espanha.1999
- XIA D.K.; PICKLES C.A. Caustic roasting and leaching of eletric arc furnace dust. **Canadian Metallurgical Quarterly**. v. 38, n° 3, pp. 175-186, 1999.