



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**VIABILIDADE DO USO DE LODO DE FOSFATIZAÇÃO
COMO PIGMENTO EM MATRIZ DE CIMENTO
PORTLAND BRANCO**

FRANCIÉLI MANTOVANI

São Leopoldo, Abril de 2014.

FRANCIÉLI MANTOVANI

**VIABILIDADE DO USO DE LODO DE FOSFATIZAÇÃO
COMO PIGMENTO EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND
BRANCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Co-Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Banca examinadora: Prof. Dr. Marcio Santos Barata

Prof^ª. Dra. Ana Paula Kirchheim

São Leopoldo, Abril de 2014.

M293v Mantovani, Francieli.
Viabilidade do uso de lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco / Francieli Mantovani. – 2014.
166f. : il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.
"Orientador: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski; co-orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio."

1. Engenharia civil. 2. Fosfatos. 3. Pigmentos. 4. Cimento Portland. 5. Concreto. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)


FRANCIÉLI MANTOVANI


**VIABILIDADE DO USO DE LODO DE FOSFATIZAÇÃO
COMO PIGMENTO EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND
BRANCO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.


Aprovada em 04 de abril de 2014.

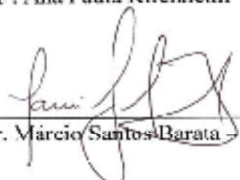

Prof.^a/Dr.^a Marlova Piva Kulakowski
Orientadora – PPGEC/UNISINOS


Prof.^a Dr.^a Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC/UNISINOS


Prof. Dr. Mauricio Marcio
Coorientador - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof.^a, Dr.^a Ana Paula Kirchheim – UFRGS


Prof. Dr. Márcio Santos Barata – UFPA

Regra de ouro: conquiste um objetivo e se faça feliz!

(Autor desconhecido).

AGRADECIMENTOS

A trajetória não foi fácil, mas quando encontramos pelo caminho pessoas de bom coração, dispostas a estender a mão para ajudar, o trabalho se torna prazeroso. Por sorte, nesta caminhada cruzei com muitas pessoas que enriqueceram e motivaram a minha jornada e é para elas que dedico este trabalho.

À Deus agradeço pela vida, pela saúde e pela energia para ir em busca dos meus sonhos.

Meu agradecimento especial à minha querida orientadora Marlova Piva Kulakowski, que me adotou e acreditou no meu potencial, despertando em mim a curiosidade e o gosto pela pesquisa.

Ao professor Mauricio Mancio, pela orientação e disposição, pelas sugestões e críticas construtivas. Aos demais professores do PPGEC – Andrea, Carlos, Claudio, Feliciane, Luciana, Luis e Marcos por todo conhecimento transmitido.

Aos colegas de mestrado, Patricia Sardão, Jorge Berwanger, Roberto Christ, Lucas Sebastiany, Daniele Gurjel, Leandro Gomes e Vinicius Marques pela companhia, pelos churrascos, pelas risadas e lanches no Rapach. Aos colegas dos tempos de graduação, Mariana e Ângelo, com quem tive a oportunidade de conviver e muito me auxiliaram. Rodrigo, obrigada pela parceria no laboratório, por dividir comigo a ansiedade da dissertação e pelo crescimento nos momentos de discussões acadêmicas. Deste período levo bons amigos e a saudade de tudo que vivenciamos juntos.

Aos bolsistas de iniciação científica e futuros engenheiros Augusto Gil, Ana Livia Lopes, Tamires Santos, Tatiane Hentges, Vágner Loba e Vinicius Menetrier, pela ajuda no programa experimental.

Ao pessoal do LMC – Mauricio, Rodrigo, Ingrid e Felipe, com esforço e competência vocês alegraram os meus dias no laboratório, tornaram as tarefas muito mais prazerosas e foram verdadeiros companheiros, participando das minhas angústias e conquistas. Às meninas do LVCM – Alini e Agnes, obrigada pelo auxílio nas caracterizações dos materiais.

Aos colegas da Construeng que souberem compreender minhas ausências e a importância deste período na minha vida profissional e pessoal.

À Tintas Killing, representada pela Eng. Cátia Silva, por disponibilizar o equipamento para as medições espectrofotométricas e pela sempre enriquecedora troca de ideias.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos e familiares, pelos momentos de descontração, pelo incentivo e bom humor. Desculpem minha ausência em muitos encontros, mas apesar disso vocês sempre se fizeram presentes com palavras de apoio e incentivo. Às amigas da arquitetura – Camila, Dani, Ellen, Nati, Nati F., Nic e Pati, vocês renovam a minha energia. À minha cunhada Ana Maria, obrigada por me acolher sempre tão carinhosamente.

Aos meus pais e meu irmão, que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis. Vocês que ouviram minhas reclamações, e muitas vezes aguentaram meu cansaço e mau humor. Só cheguei até aqui porque vocês me ensinaram que sonhar é bom, mas que correr em busca dos sonhos é melhor ainda.

E por fim, ao meu amor e engenheiro preferido, Rafael, por todo carinho e paciência nos momentos difíceis. Obrigada por estar sempre ao meu lado, me incentivando a enfrentar novos desafios e vibrando as minhas conquistas. Te amo!

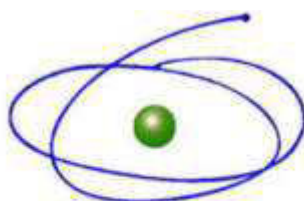
FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares.

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
CAPES/PROSUP.

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



FINEP

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA



FAPERGS

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral.....	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	28
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	CONCRETO COLORIDO	31
2.1.1	Materiais constituintes do concreto colorido	36
2.1.2	Efeito dos pigmentos nas propriedades do concreto	44
2.1.3	Execução do concreto colorido	47
2.2	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO PIGMENTOS	50
2.2.1	Estudos de resíduos como pigmentos	51
2.2.2	Lodo de fosfatização.....	52
2.3	FUNDAMENTOS DE COLORIMETRIA	56
2.3.1	A luz.....	56
2.3.2	O objeto	57
2.3.3	O observador	58
2.4	SISTEMAS DE AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA	59
2.4.1	CIELab	59
2.4.2	Histogramas de cor	61
2.5	ESTUDO DA RETRAÇÃO EM CONCRETO.....	62
2.6	CINZA VOLANTE	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	73
3.1.1	Variáveis de resposta.....	73
3.1.2	Fatores de controle.....	73
3.1.3	Fatores fixos	73
3.1.4	Fatores não controlados.....	74
3.1.5	Organização do programa experimental.....	74
3.2	MATERIAIS.....	76
3.2.1	Cimento.....	76
3.2.2	Agregado	77
3.2.3	Cinza volante (CV).....	78
3.2.4	Lodo de fosfatização (LF).....	82
3.2.5	Pigmento comercial (PG).....	87
3.2.6	Aditivo	90
3.2.7	Água.....	91
3.3	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	91
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO	94
3.4.1	Resistência à compressão	94
3.4.2	Retração	94
3.4.3	Absorção de água por capilaridade	95
3.4.4	Resistência à tração na flexão.....	97
3.4.5	Manutenção da cor.....	97
3.4.6	Análise estatística.....	99
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	101
4.2	RETRAÇÃO.....	107
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	112
4.4	TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	115

4.5	CONTROLE CROMÁTICO.....	119
4.5.1	Parâmetro L^*	120
4.5.2	Parâmetro ΔE	126
5	CONCLUSÃO.....	133
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
	APÊNDICES.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual de CPB no Brasil.	37
Tabela 2- Compostos principais do cimento Portland.....	38
Tabela 3 - Principais componentes do cimento Portland e suas características.	39
Tabela 4 - Início e fim de pega do LF.	54
Tabela 5 - Cor espectral para cada faixa do comprimento de onda na região de luz visível....	57
Tabela 6 - Percepção das diferenças de cor ΔE	61
Tabela 7 - Principais propriedades do concreto relacionadas com a retração térmica.	64
Tabela 8 - Fatores de controle.	73
Tabela 9 - Matriz experimental.	75
Tabela 10 - Caracterização do cimento Portland branco estrutural.	76
Tabela 11 - Fluorescência de Raios-X do cimento Portland branco.	77
Tabela 12 - Caracterização física do agregado miúdo.....	78
Tabela 13 - Fluorescência de raios-X da Cinza volante.	79
Tabela 14 - Caracterização da cinza volante.	79
Tabela 15 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade.	79
Tabela 16 - Análise quantitativa por EDS da cinza volante.	82
Tabela 17 - Fluorescência de raios-X do Lodo de fosfatização.	83
Tabela 18 - Caracterização química via ICP-AES do LF.....	84
Tabela 19 - Caracterização do Lodo de fosfatização.....	84
Tabela 20 - Análise quantitativa por EDS do lodo de fosfatização.....	87
Tabela 21 - Fluorescência de raios-X do Pigmento comercial.....	87
Tabela 22 - Caracterização do Pigmento comercial.	88
Tabela 23 - Análise quantitativa por EDS do pigmento comercial.	90
Tabela 24 - Dados técnicos do aditivo superplastificante.	91
Tabela 25 - Quantitativos de materiais para os traços estudados.	93
Tabela 26 - Média dos resultados de resistência à compressão nas idades ensaiadas.....	102
Tabela 27 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão com lodo de fosfatização.....	102
Tabela 28 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão com pigmento comercial.....	103
Tabela 29 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação dimensional com lodo de fosfatização.....	108
Tabela 30 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação dimensional com pigmento comercial.....	108
Tabela 31 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à tração na flexão com lodo de fosfatização.....	112
Tabela 32 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à tração na flexão com pigmento comercial.....	112
Tabela 33 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à taxa de absorção capilar com lodo de fosfatização.....	115
Tabela 34 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à taxa de absorção capilar com pigmento comercial.....	115
Tabela 35 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução da luminosidade L^* com lodo de fosfatização.....	120
Tabela 36 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução da luminosidade L^* com pigmento comercial.....	120

Tabela 37 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação colorimétrica ΔE com lodo de fosfatização.....	127
Tabela 38 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação colorimétrica ΔE com pigmento comercial.	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hotel Unique.....	32
Figura 2 - Complexo Cultural Praça das Artes.....	32
Figura 3 - Catedral Nossa Senhora dos Anjos, Estados Unidos.....	33
Figura 4 - Bodega Antión, Espanha.	33
Figura 5 - Hotel ESO, Chile.	34
Figura 6 - Casa das Histórias Paula Rego, Portugal.....	35
Figura 7 - Elementos urbanos produzidos pelo Estudio Cabeza.	35
Figura 8 - Passeio central composto por meios fios brancos e tijolos vermelhos, Estados Unidos.....	36
Figura 9 - Influência do teor de agregado sobre a retração por secagem.	40
Figura 10 - Resistência à compressão de concretos pigmentados, aos 7 dias.	45
Figura 11 - Espectro de radiação eletromagnética, com destaque para o espectro de luz visível.	57
Figura 12 - Espaço de cor CIELab.	60
Figura 13 – (a) uma imagem I; (b) o histograma da imagem em valores e (c) a representação gráfica do histograma.	62
Figura 14 - Morfologia das partículas de CV (a) esferas sólidas, (b) cenosferas ocas, (c) partículas de carbono não queimadas.	68
Figura 15 - Retração autógena.....	70
Figura 16 - Fluxograma representativo do programa experimental.	75
Figura 17 - Resistência à compressão do cimento Portland branco.	76
Figura 18 - Distribuição granulométrica do cimento Portland branco.	77
Figura 19 - Curva de distribuição granulométrica da areia.	78
Figura 20 - Difratoograma de Raios X da cinza volante.	80
Figura 21 - Distribuição granulométrica da cinza volante.	80
Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza volante (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 5.000x.....	81
Figura 23 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes da cinza volante (a) silício; (b) alumínio; (c) potássio; (d) ferro.	82
Figura 24 - Aspecto visual do LF (a) natural e (b) após moagem.	83
Figura 25 - Distribuição granulométrica do lodo de fosfatização.	84
Figura 26 - Difratoograma de Raios X do lodo de fosfatização.	85
Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura do lodo de fosfatização (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 10.000x.....	86
Figura 28 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes do lodo de fosfatização (a) ferro; (b) oxigênio; (c) magnésio; (d) cálcio.....	86
Figura 29 - Aspecto do pigmento comercial.	87
Figura 30 - Análise granulométrica do pigmento comercial.	88
Figura 31 - Difratoograma de Raios X do pigmento comercial.	89
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura do pigmento comercial (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 10.000x (c) aumento de 20.000x (d) aumento de 40.000x.....	90
Figura 33 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes do pigmento comercial (a) ferro; (b) oxigênio.	90
Figura 34 - Ensaio de retração.....	94
Figura 35 - Sistema experimental do método de absorção capilar.	95
Figura 36 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade.....	96
Figura 37 - Local de exposição dos corpos de prova destinados ao ensaio colorimétrico.....	97

Figura 38 - Leituras colorimétricas com equipamento espectrofotométrico.	98
Figura 39 - Efeito isolado da variável teor de material pigmentante no comportamento de resistência à compressão com (a) 'lodo de fosfatização' e (b) pigmento no comportamento	103
Figura 40 - Efeito isolado da variável 'cinza volante' no comportamento de resistência à compressão axial com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	104
Figura 41 - Efeito isolado da variável 'cinza volante' no comportamento de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, com lodo de fosfatização e pigmento comercial.	105
Figura 42 - Efeito isolado da variável 'idade' no comportamento de resistência à compressão axial com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	106
Figura 43 - Resistência à compressão em função do efeito da interação entre a cinza volante, o material pigmentante e a idade com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.	106
Figura 44 - Efeito isolado da variável 'teor de pigmento' no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	108
Figura 45 - Efeito isolado da variável cinza volante no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	109
Figura 46 - Efeito isolado da variável idade no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	111
Figura 47 - Variação dimensional em função do efeito da interação entre a cinza volante, o material pigmentante e a idade com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.	111
Figura 48 - Efeito isolado da variável teor de material pigmentante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.	113
Figura 49 - Efeito isolado da variável cinza volante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	113
Figura 50 - Efeito da interação entre cinza volante e material pigmentante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	114
Figura 51 - Efeito isolado do teor de material pigmentante nos resultados de taxa de absorção com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	116
Figura 52 - Efeito isolado do teor de cinza volante nos resultados de taxa de absorção com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	117
Figura 53 - Taxa de absorção capilar em função do efeito da interação entre a cinza volante e o material pigmentante com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.	118
Figura 54 - Efeito isolado do teor de material pigmentante na evolução do parâmetro L* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	121
Figura 55 - Imagens digitais dos traços (a) CV20_LF20 (b) CV20_PG1 após a desforma. .	122
Figura 56 - Efeito isolado da cinza volante na evolução do parâmetro L* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	122
Figura 57 - Imagens digitais dos traços (a) CV0_LF20 (b) CV20_LF20 após a desforma. .	123
Figura 58 - Efeito isolado do tipo de exposição na evolução do parâmetro L* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	123
Figura 59 - Efeito isolado da idade na evolução do parâmetro L* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.	124
Figura 60 - Imagens digitais do traço CV10_LF20 (a) após a deforma, (b) aos 7 dias de exposição natural, (c) aos 126 dias de exposição natural.	124
Figura 61 - Imagens digitais do traço CV10_PG5 (a) após a deforma, (b) aos 7 dias de exposição natural, (c) aos 126 dias de exposição natural.	125
Figura 62 - Evolução no parâmetro L* em função da interação entre o tipo de exposição e o teor de adição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	125
Figura 63 - Evolução no parâmetro L* em função da interação entre o material pigmentante, a cinza volante, a idade (126 dias) e tipo de exposição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.	126

Figura 64 - Efeito isolado do teor de material pigmentante na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.....	128
Figura 65 - Efeito isolado da variável cinza volante na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.....	129
Figura 66 - Efeito isolado da variável tipo de exposição na variação colorimétrica ΔE com (a)lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.....	129
Figura 67 - Efeito isolado da variável idade na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.....	130
Figura 68 - Variação colorimétrica ΔE em função da interação entre o tipo de exposição e o teor de adição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.....	131

RESUMO

MANTOVANI, F. **Viabilidade do uso de lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco**. São Leopoldo, 2014. 161 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

O desenvolvimento de materiais com tecnologia avançada faz parte do processo de modernização em que se encontra a construção civil. O aperfeiçoamento de concretos coloridos produzidos com pigmentos merece atenção especial por suas propriedades físicas e químicas aliadas às questões estéticas, o qual permite o uso de elementos de concreto aparentes suscetíveis à ação das intempéries. A incorporação de pigmentos resistentes e com alto poder de coloração possibilita o uso do concreto colorido aparente, eliminando-se gastos com revestimento e manutenção excessiva. O emprego de cinza volante (CV) pode trazer melhorias nas propriedades do concreto além de, a partir da substituição do cimento, aumentar a sustentabilidade e ecoeficiência da edificação. Muitos dos pigmentos empregados na produção destes concretos originam-se de óxidos metálicos, em particular de óxidos de ferro. Alguns resíduos contêm ferro em sua composição, como é o caso do lodo de fosfatização (LF), um resíduo da indústria metal mecânica, gerado no tratamento de efluentes do processo de revestimento fosfático do aço. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade do uso do resíduo lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco e cinza volante. Como é a argamassa do concreto que proporciona coloração na face aparente dos mesmos, o programa experimental empregou esta fração como matriz para conduzir os ensaios, com uma única proporção de cimento e areia e relação água/aglomerante de 0,40. Para efeitos de comparação trabalhou-se com um pigmento inorgânico, de cor alaranjada, disponível comercialmente. Conforme a prática corrente na produção de concretos pigmentados, e de acordo com a indicação do fabricante, os teores utilizados foram de 0%, 1% e 5%, em relação à massa de cimento, substituindo o agregado natural em volume. Da mesma forma, o lodo de fosfatização foi utilizado nos teores de 0%, 5%, 10% e 20%. Pesquisou-se também a influência da substituição do cimento Portland branco por cinza volante, com teores de 0%, 10% e 20%. Testou-se a resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos aos 7 e 28 dias de idade e a resistência à tração na flexão, aos 28 dias, em corpos de prova prismáticos. Os ensaios de absorção de água por capilaridade e retração avaliaram o comportamento físico das argamassas. O controle cromático foi realizado pelo método espectrofotométrico, sendo monitorados os parâmetros $L^*a^*b^*$ e ΔE em corpos de prova submetidos a dois estados de exposição: testemunho e natural. Para a verificação de quais fatores exercem efeito significativo sobre as variáveis de resposta, todos os resultados experimentais foram analisados estatisticamente através de uma análise de variância (ANOVA). Os resultados mostram que, em média, a cinza volante trouxe benefícios para a maior parte das propriedades estudadas, representando um ganho ambiental por ser capaz de reduzir o consumo de cimento sem causar perdas em relação à durabilidade e resistência mecânica. Os teores de materiais pigmentantes estudados foram considerados significativos para quase todas as variáveis analisadas, representando uma diminuição nos valores para os ensaios de resistência à compressão conforme o aumento do teor. Entretanto, os dois tipos de pigmentos estudados trouxeram benefícios em relação à retração e taxa de absorção capilar. Quanto à cromacidade, a pigmentação com LF foi menos intensa do que a proporcionada pelo PG, entretanto apresentou valores de variação de cor semelhantes, o que pode indicar estabilidade na matriz cimentícia. Além disso, observou-se que a incorporação de CV não trouxe prejuízos à cor.

Palavras-chave: lodo de fosfatização; pigmento inorgânico, concreto cromático.

ABSTRACT

MANTOVANI, F. **Feasibility of using phosphate sludge as a pigment in white Portland cement matrix**. São Leopoldo, 2014. 161p. Thesis (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The development of materials with advanced technology is part of the modernization process that construction area is facing. The improvement of colored concrete produced with pigments deserves special attention for their physical and chemical properties allied to aesthetic issues, which allows the use of apparent colored concrete elements susceptible to weather attack. The incorporation of resistant and high power coloring pigments allows the use of colored apparent concrete, eliminating excessive expenses with maintenance coatings. The use of fly ash (FA) can bring improvements in the properties of concrete, as well as, from the replacement of cement, leads to increase the sustainability and eco-efficiency of the building. Many of the pigments used in the actual colored concrete production are originate from metal oxides, particularly iron oxides. Some wastes contain iron in its composition, such as phosphate sludge (FS), a waste of the metalworking industry generated by the treatment of effluents in the process of steel phosphate coating. In this context, the aim of this research is to evaluate the feasibility of using phosphate sludge as a pigment, combined with white Portland cement and fly ash. As the concrete mortar is responsible for the coloration of the face side of a concrete, this fraction was employed on this experimental program as a pattern to conduct the tests with a single cement and sand ratio and a water/binder ratio of 0.40. For comparison, an inorganic pigment, commercially available, was also used. According to current practice in the production of colored concrete, and according to the pigment manufacturer, the levels used were: 0 %, 1% and 5% by mass of cement, replacing natural aggregate by volume. Similarly, the phosphate sludge was used in concentrations of: 0 %, 5 %, 10% and 20%. The influence of white Portland cement replacement by fly ash, with levels of 0%, 10% and 20%, was also evaluated. The tests included compressive strength in cylindrical specimens at ages of 7 and 28 days and tensile strength in bending, at 28 days, in prismatic specimens. The tests of water absorption by capillarity and shrinkage, evaluated the physical behavior of mortars. The color control was performed by the spectrophotometric method, monitoring the parameters $L^*a^*b^*$ and ΔE in specimens submitted to two states of exposure: witnessing and natural. To investigate which factors have a significant effect on the response variables, all experimental results were statistically analyzed using an ANOVA. The results show that, on average, fly ash benefited most of the studied properties with also an environmental gain by being able to reduce the consumption of cement without causing losses in relation to the durability and the mechanical strength. The contents of pigments studied were considered significant for almost all variables, representing a decrease in values for tests of compressive strength while increasing its content. However, both types of the studied pigments brought benefits in relation to the rate of shrinkage and capillarity absorption. As for the chromaticity, the FS pigmentation was less intense than that provided by the inorganic pigment. Anyway, the values showed similar color variation, which can indicate some stability in the cementitious matrix. It was observed that the incorporation of FA not bring damage to color.

Key-words: phosphate sludge; inorganic pigment, chromatic concrete.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil incluindo sua cadeia produtiva é uma das maiores consumidoras de matérias-primas, energia, recursos naturais e uma das principais geradoras de resíduos, mas, ao mesmo tempo, constitui-se em potencial consumidora de subprodutos e resíduos gerados por ela e pelos outros setores industriais (CALMON, 2010). Porém, a reutilização tem se limitado à simples incorporação de resíduos em produtos sem valor agregado, com o fim de torná-los inertes, não prejudicando as características do produto final, mas sem realmente aproveitar as suas potencialidades (COSTA, 2009).

Dentro deste contexto, a incorporação de princípios de sustentabilidade e ecoeficiência na construção civil é uma tentativa de diminuir gastos de energia, reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera, dar destino para rejeitos de diversas origens e reduzir a extração de recursos naturais, através da seleção de materiais e/ou resíduos, com durabilidade adequada à sua aplicação e ao meio de exposição.

A aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) demonstra que a discussão em busca de um novo modelo de desenvolvimento ambientalmente sustentável amadureceu na sociedade e é um fator cada vez mais dominante nas atividades diárias de engenheiros e arquitetos (JOHN, 2010). Além disso, a necessidade, por parte do mercado, de produtos cada vez mais competitivos e ações que contribuam para a preservação do meio ambiente tem estimulado a pesquisa de materiais de baixo custo e assumem um interesse crescente (COSTA, 2009)

De acordo com o *World Business Council on Sustainable Development*, os três pilares do desenvolvimento sustentável são o crescimento econômico, equilíbrio ecológico e progresso social, e não se pode ter qualquer um sem os outros. Globalmente, as empresas de cimento estão produzindo cerca de dois bilhões toneladas/ano de seu produto e emitindo quase dois bilhões de toneladas de CO₂ no processo (cerca de 6 a 7% das emissões totais de CO₂ do planeta) (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011), devendo aumentar cerca de 4 bilhões de toneladas ao ano, com crescimento maior previsto para países como China e Índia (SCHNEIDER et al., 2011).

Assim, na procura de formas de reduzir as emissões globais de CO₂ relacionadas com a fabricação de cimento, é preciso considerar não apenas o seu processo de fabricação, mas também onde e como os recursos de matérias primas serão encontrados, onde e como o produto vai ser utilizado e o impacto sobre a comunidade (GARTNER, 2004). Portanto torna-

se necessário o uso de tecnologias sustentáveis. Diversos resíduos industriais, com destaque para a cinza volante, vêm sendo estudados em diferentes aplicações e empregados na produção do cimento Portland, por ser capaz de diminuir o consumo de clínquer. De uma maneira geral, pode-se dizer que na construção civil não só o cimento pode obter uma maior sustentabilidade com o uso de resíduos, mas também outros materiais e componentes construtivos podem ter melhorados os aspectos de sustentabilidade ao incorporarem resíduos.

Aliado a isso, a padronização de procedimentos, a racionalização de atividades, a redução de desperdícios e o desenvolvimento de novos materiais e produtos com tecnologia avançada fazem parte do processo de modernização em que se encontra a construção civil no Brasil. Para Kirchheim et al. (2011) esse cenário de inovação tem beneficiado o desenvolvimento de concretos especiais e o surgimento de novas demandas de desempenho para o concreto estrutural e, dentre outras, as questões estéticas começaram a ser repensadas.

Tem-se, como concepção urbanística, que para a total integração de um edifício em determinado entorno, é fundamental a correta seleção dos materiais, das texturas das superfícies e particularmente das cores (COELHO, 2002). Através da utilização de cores em edificações urbanas consegue-se um entorno mais agradável e humano, de acordo com as exigências estéticas da sociedade. A utilização do concreto aparente representa o uso do concreto não apenas como finalidade técnica de um sistema construtivo, mas também como um elemento estético da estrutura e modo de expressão (TUDORA, 2011).

O concreto aparente branco e pigmentado pode satisfazer as premissas apontadas anteriormente, desde que sejam tomados cuidados quanto à principal preocupação no projeto e na construção de estruturas de concreto, especialmente quando utilizado aparente, que é a garantia de que a estrutura permaneça monolítica, livre de fissuras. Desta forma, todo o esforço no controle deve ser feito considerando, entre outros aspectos, a seleção dos materiais e práticas de construção adequadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Contudo, o conhecimento tecnológico de um material de construção não pode ser restrito às suas propriedades mecânicas. O comportamento ao longo do tempo, isto é, o desempenho do material em relação às solicitações ambientais a que estará sujeito ao longo da vida útil, é essencial no estudo de sua viabilidade técnica e econômica (WOLF, 2010). Em estruturas de concreto, especialmente as aparentes, as condições ambientais sob as quais essa estrutura está exposta são tão importantes quanto suas propriedades mecânicas, pois, temperatura, umidade relativa, vento, poluição, agressividade da água, entre outros, são parâmetros que influenciam na degradação do material (LIMA, 2011). Desta forma, o

concreto cromático merece especial atenção sob o ponto de vista da durabilidade, não apenas por suas propriedades físicas e químicas, mas também pelo seu uso estético.

Neste contexto, esta pesquisa propõe o estudo de resíduo como material pigmentante para emprego em concretos coloridos. Sendo este tipo de concreto empregado aparente, os cuidados com durabilidade são maiores, recomendando-se o uso de relação água/aglomerante inferior a 0,45. Entretanto, traços com baixa a/agl têm elevado consumo de cimento o que pode acarretar problemas de aumento excessivo de temperatura e consequente retração térmica no resfriamento, levando a maior retração e fissuração, possivelmente afetando negativamente a durabilidade. Assim, o emprego de cinza volante é proposto de forma a mitigar estes problemas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar da primeira preocupação em relação à gestão de resíduos ser a minimização da geração dos mesmos, o certo é que há muitos casos de processos produtivos em que determinados resíduos nunca serão evitados. Portanto, a investigação e o desenvolvimento de processos tecnológicos capazes de transformar os resíduos no sentido de reciclá-los são plenamente justificados e passou a ser uma realidade (SILVA, 2006).

A reciclagem de resíduos potencialmente perigosos, provenientes de atividades industriais, ou sua transformação em um produto estabilizado, não lixiviável e que seja disposto com segurança, é uma importante questão ambiental.

De acordo com Silva (2006), a recuperação de metais com valor econômico a partir dos lodos ou a incorporação transformando-os em subprodutos, inseridos novamente no ciclo produtivo, pode vir a reduzir custos e abrir novas oportunidades de negócio, além de contribuir na redução do volume de extração de matérias primas e áreas de deposição.

Neste contexto, enquadra-se o revestimento fosfático, ou seja, a etapa de pré tratamento de superfícies de metais ferrosos e não ferrosos. Este processo nada mais é do que a deposição de uma camada de cristais de fosfato de zinco de grande aderência sobre a peça metálica a fim de aumentar a porosidade e permitir uma boa penetração da tinta aplicada posteriormente. O lodo de fosfatização (LF) é o resíduo sólido gerado durante o tratamento dos efluentes oriundos deste processo. É gerado em indústrias que possuem em seu processo produtivo a etapa de pintura em superfícies metálicas, como por exemplo, montadoras, fabricantes de autopeças, móveis e eletrodomésticos (GIFFONI E LANGE, 2005). Em alguns casos o resíduo é encaminhado para aterros industriais ou para tratamento através do processo

de troca iônica (BREHN et al., 2013). O LF utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado por uma empresa localizada no Rio Grande do Sul, que desenvolve, produz e fornece sistemas de linha de transmissão automotiva. Atualmente, a empresa gera em torno de 3,5 ton de LF ao mês.

A indústria de pigmentação apresenta potencial para absorver os resíduos da siderurgia por conterem elevado teor de ferro sob a forma de óxidos ou ligas metálicas (PRIM et al., 2011). Costa (2009) acrescenta que a indústria de pigmentação tem procurado encontrar novas estratégias concorrenciais, tais como:

- Otimização e desenvolvimento de processos produtivos alternativos ao método tradicional;
- Desenvolvimento de novos pigmentos;
- Otimização da qualidade cromática;
- Busca de matérias primas alternativas e de menor custo.

Para Prim et al. (2011), a importância de pigmentos de óxido de ferro se baseia na sua atoxicidade, estabilidade química, durabilidade, variedade de cores e em particular no seu baixo custo para mercados emergentes. Costa (2009) salienta que embora a seleção das matérias primas seja essencial para a obtenção de um pigmento de qualidade, sendo normalmente utilizados óxidos metálicos, tem-se verificado que fontes desse elemento com menor grau de pureza podem apresentar um excelente desempenho. Esta solução pode representar uma oportunidade de transformar uma fonte de despesa (disposição em aterro), numa fonte de receitas e redução do consumo de recursos naturais não renováveis.

Justifica-se a utilização de óxidos de ferro na produção de pigmento por sua ampla variedade de cores, alta estabilidade térmica e atoxicidade sendo que, atualmente, o uso de subprodutos industriais vem ganhando espaço como fonte de óxidos pigmentantes. Como consequência, tem-se o desenvolvimento de processos mais econômicos e eficientes, o que proporciona a produção de novas possibilidades de cores e uma melhora nas características dos pigmentos já utilizados. A introdução de matérias-primas alternativas constitui um importante segmento de pesquisa, entretanto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias a fim de que possam competir com os materiais convencionais.

A fim de diminuir os impactos ambientais gerados pelo cimento, a partir da segunda metade do século XX, parte do material tem sido substituída por adições minerais,

geralmente subprodutos industriais que seriam depositados como rejeito. As vantagens dessa substituição são muito significativas, tanto no âmbito técnico e econômico mas principalmente no ambiental, pois a redução na emissão de CO₂, de consumo de energia e muitas vezes de custo, é proporcional à quantidade de adição mineral utilizada na mistura (ISAIA; GALTALDINI, 2004). Em função da disponibilidade e do custo, a cinza volante está entre as adições minerais mais utilizadas. Para o meio ambiente, as partículas de cinza são consideradas altamente contaminantes devido ao enriquecimento em elementos potencialmente tóxicos que condensam a partir da combustão do gás (AHMARUZZAMAN, 2010).

No mundo são geradas aproximadamente 1 bilhão de toneladas de cinza volante ao ano (KUPAEI et al., 2013). Somente as termoeletricas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina produzem aproximadamente 1,4 milhões de toneladas de cinza volante por ano (SILVA, 2010) Assim, a quantidade de resíduos da queima de carvão (cinzas), lançados por fábricas e usinas térmicas tem vindo a aumentar ao longo do mundo, e a eliminação da grande quantidade tornou-se um grave problema ambiental. A utilização de cinzas em nível mundial variou muito, ainda que a média mundial equivalha a 16% do total de cinzas, uma quantidade substancial ainda é depositada em aterros ou lagoas, com um custo significativo para as empresas (AHMARUZZAMAN, 2010).

Desta forma, ao considerar os aspectos técnicos, estéticos e ambientais, esta pesquisa busca agregar valor aos subprodutos gerados em processos produtivos, visando o desenvolvimento ambiental através da reciclagem.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral, esta pesquisa visa avaliar a viabilidade do uso do resíduo lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco com cinza volante.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são avaliar a influência do tipo de material pigmentante (lodo de fosfatização e pigmento comercial) e do teor de adição associados ao uso de cinza volante quanto a:

- Resistência à compressão;

- Variação dimensional;
- Resistência à tração na flexão;
- Taxa de absorção capilar;
- Capacidade de pigmentação e evolução do comportamento colorimétrico ao longo do tempo.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa é desenvolvida em seis capítulos. O primeiro capítulo abrange a introdução e justificativa, demonstrando a problemática do estudo e sua relevância, seguido dos objetivos a serem alcançados no estudo, limitações e organização do trabalho.

O segundo e terceiro capítulos contemplam a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema de pesquisa, com enfoque em concreto cromático, retração, cinza volante e fundamentos de análise e durabilidade da cor.

O capítulo quatro apresenta o programa experimental definido para este estudo, contemplando e justificando a escolha das variáveis de resposta, assim como os materiais e métodos utilizados na pesquisa.

Os resultados obtidos na realização do programa experimental, as análises e discussões dos mesmos, correlacionados com outros resultados encontrados na literatura, são apresentados no capítulo cinco.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais, respondendo aos objetivos específicos do estudo.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Vários são os fatores que interferem no desempenho do concreto; como o tipo de cimento, a relação água aglomerante (a/agl), os agregados, as condições de ensaio, os métodos utilizados, entre outros. Por isso, é necessário estabelecer os limites desenvolvidos durante o programa experimental. Destacando-se:

- Decidiu-se trabalhar com apenas um tipo de cimento, o Portland branco estrutural, fixando-se também a marca e o lote, embora se tenha conhecimento de que existem diferenças cromáticas importantes entre os diversos tipos de cimento fabricados;

- Foram empregados três percentuais de substituição do cimento pela cinza volante, 0%, 10% e 20%, com substituição em volume;
- A incorporação de material pigmentante (lodo de fosfatização ou pigmento comercial) foi feita em relação à massa de cimento, mas como substituição ao agregado miúdo, em volume.
- Empregaram-se três teores de lodo de fosfatização 5%, 10% e 20%. Devido ao alto poder de saturação do pigmento comercial, foram utilizados dois teores, 1% e 5%;
- Dadas as limitações de tempo, consideraram-se quatro idades para a verificação do ensaio colorimétrico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão apresentados assuntos pertinentes ao estudo sobre o concreto cromático como: contextualização, suas propriedades, materiais constituintes e forma de produção; resíduos com possibilidade de emprego na produção do concreto colorido e sistemas de análise de cor.

2.1 CONCRETO COLORIDO

O concreto é um material que apresenta grandes virtudes sob o ponto de vista estrutural devido a certas propriedades como boa resistência mecânica, flexibilidade de uso e formas, baixa permeabilidade e baixo custo de produção. Entretanto, conforme Passuelo (2004) o material necessita ser mais sustentável, com menor impacto ambiental, mais econômico, mais durável e mais atraente. A essas características deve-se incluir a aparência estética obtida através de texturas, formas diferenciadas e cores.

O concreto colorido tornou-se popular entre engenheiros e arquitetos para aplicações em, por exemplo, calçadas, pisos, produtos de concreto e outros usos arquitetônicos (WILLS, [s.d.]). A versatilidade cromática e a valorização da estrutura como elemento estético estão entre as principais razões pelas quais alguns projetistas têm especificado o cimento branco em suas obras (DELLINGHAUSEN; ISAIA; VEIGA, 2009).

A capacidade de produzir cor permanente, sem afetar negativamente outras propriedades do concreto deve ser determinada para que os pigmentos possam ser utilizados com confiança e segurança. Assim, o concreto tem sua aceitação como elemento arquitetônico através da incorporação de pigmentos que lhe conferem elevado valor estético onde, através de edificações e do mobiliário urbano, consegue-se um entorno agradável (COELHO, 2002).

Admite-se que a primeira obra executada em concreto colorido tenha sido a fábrica de cigarros “*The Carreras Black Cat*”, no ano de 1928, no Reino Unido, onde foram misturados cimento Portland e areia colorida em tons ocre, proveniente da África do Sul. Apesar da repercussão, o concreto colorido voltou a ser utilizado apenas a partir da década de 1980, nos Estados Unidos (COELHO, 2000).

No Brasil, o arquiteto Ruy Ohtake é um entusiasta do concreto cromático. Entre suas obras destaca-se o Hotel Unique (Figura 1), em São Paulo, projetado em 1995. No local, uma mesma parede possui cores diferentes (vermelho e grafite) nos lados interno e externo, resultantes da aplicação de concreto jateado colorido (HARTMANN; BENINI, 2011).



Figura 1 - Hotel Unique.

Fonte: www.ruyohtake.com.br

Segundo Porter (2011), a estética de uma estrutura está condicionada a três fatores que devem ser considerados na hora de projetar: o desenho formal, o equilíbrio com o entorno e seus acabamentos. Apesar da existência de modas, uma adequada associação dos três fatores pode resultar em estruturas com uma estética atemporal.

O Complexo Cultural Praça das Artes (Figura 2), inaugurado em dezembro de 2012, em São Paulo, contempla um extenso e complexo programa: a construção de três módulos de novas edificações executadas em concreto armado e interligadas entre si, especialmente concebidas para abrigar em um único conjunto todas as unidades vinculadas ao Teatro Municipal de São Paulo. Além de ser um equipamento cultural, o projeto é uma intervenção urbanística que serve como alavanca de transformação do entorno por meio da requalificação da quadra há décadas abandonada. O complexo teve toda sua estrutura da fachada colorida em duas cores de pigmento: marrom e vermelho (CICHINELE, 2012).



Figura 2 - Complexo Cultural Praça das Artes.

Fonte: www.revistatechne.com.br

A Catedral de Nossa Senhora dos Anjos (Figura 3), localizada em Los Angeles, Estados Unidos, teve sua construção iniciada em 1999 e conclusão das obras em 2002. Projetada pelo arquiteto espanhol José Rafael Moneo, a catedral é de estilo contemporâneo, executada em concreto colorido e praticamente não possui ângulos retos.



Figura 3 - Catedral Nossa Senhora dos Anjos, Estados Unidos.

Fonte: www.olacathedral.org

Na Espanha, o arquiteto Jesús Marino Pascual, concebeu o edifício da Bodega Antión (Figura 4) como um espaço para a produção e apresentação de vinhos, gastronomia e hotelaria de luxo. A cor ocre dominante do concreto reforça a intenção arquitetônica de integrar diferentes níveis e espaços na concepção global (LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY, 2008).



Figura 4 - Bodega Antión, Espanha.

Fonte: Lanxess (2008).

O Hotel ESO (Figura 5), situado nas proximidades do *European Southern Observatory*, na região de Cerro Paranal no deserto chileno de Atacama, funciona como uma casa de hóspedes para cientistas que conduzem pesquisas no observatório durante

determinados períodos. Com seu concreto aparente pigmentado, a construção monolítica integra-se ao entorno desértico. O concreto foi colorido com pigmentos de óxido de ferro para refletir os tons avermelhados do deserto, permitindo alcançar uma integração óptica com a paisagem. As propriedades termicamente inertes da estrutura maciça de concreto têm uma influência favorável sobre as temperaturas internas, já que compensam as variações extremas de temperatura entre o dia e à noite (LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY, 2009).



Figura 5 - Hotel ESO, Chile.

Fonte: Lanxess (2009).

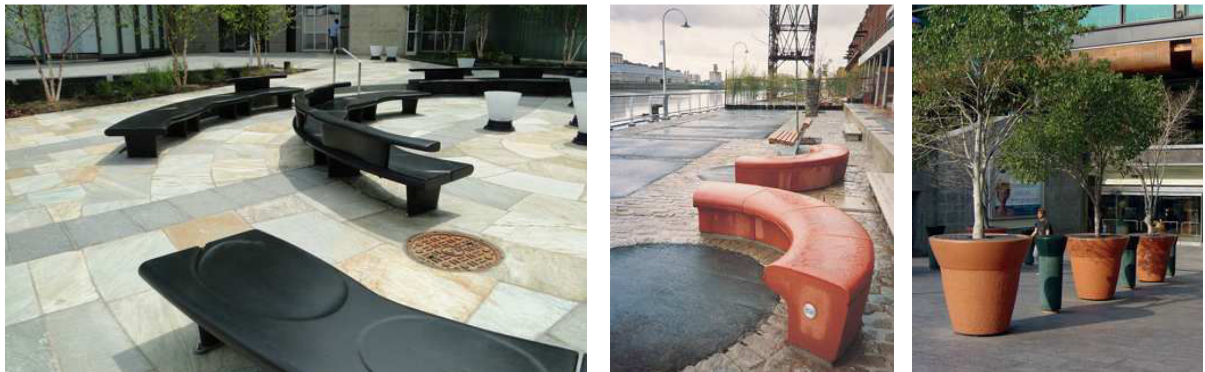
Com projeto do arquiteto português Eduardo Souto de Moura, a Casa das Histórias Paula Rego (Figura 6), inaugurada em 2008, em Portugal, expõe obras da artista internacionalmente reconhecida. Para atender ao conceito arquitetônico da construção, era necessário adotar uma coloração que permitisse ao museu preencher uma lacuna no ambiente natural para se integrar à paisagem local. O produto deveria, portanto, proporcionar um contraste entre o mineral e o vegetal. Ao optar pelo concreto colorido em vermelho, foi possível criar uma construção que atendeu todos os requisitos estruturais e técnicos exigidos por um museu, sem sacrificar o conforto do ambiente. Intencionalmente foi utilizada essa tonalidade de concreto em contraste ao verde, o que possibilitou ao local uma concepção diferenciada e que reinterpreta a arquitetura histórica da região de forma contemporânea. As paredes internas receberam reboco branco contrastando o concreto colorido em vermelho (LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY, 2011).



Figura 6 - Casa das Histórias Paula Rego, Portugal.

Fonte: www.arcoweb.com.br

Na Argentina, o Estudio Cabeza, empresa especializada no desenvolvimento e desenho de elementos urbanos para espaços públicos (Figura 7) vem desenvolvendo projetos inspirados na topografia, na ergonomia e na natureza, utilizando a cor como forma de definir a identidade do local, caracterizando a paisagem urbana da cidade e da vida em comunidade.



(a)

(b)

(c)

Figura 7 - Elementos urbanos produzidos pelo Estudio Cabeza.

Fonte: www.estudiocabeza.com

Em Chicago, nos Estados Unidos, passeios e meios fios foram executados com concreto branco e pigmentos (Figura 8). Cores vivas foram utilizadas evitando retrabalhos com pintura, proporcionando melhor visibilidade e segurança aos motoristas e pedestres, além de embelezar a paisagem urbana (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA), 2002).



Figura 8 - Passeio central composto por meios fios brancos e tijolos vermelhos, Estados Unidos.

Fonte: PCA (2002).

2.1.1 Materiais constituintes do concreto colorido

2.1.1.1 Cimento Portland branco estrutural

O cimento Portland branco estrutural é utilizado em concreto branco e colorido com o objetivo de reproduzir com maior fidelidade a cor desejada, dispensando o uso de pintura e outros revestimentos (PIOVESAN, 2009). Diferencia-se dos demais pela sua coloração, conseguida através da redução do teor de ferro no clínquer, além do uso de argila e rochas carbonáticas livres de ferro como matérias primas, moinhos especiais de bolas, com revestimentos e bolas cerâmicas para a moagem e mistura da matéria prima, e combustível limpo, como óleo ou gás (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Conforme Kirchheim et al. (2011), através da utilização de bolas especiais de cerâmica, níquel ou molibdênio e o emprego de combustível na queima a base de óleo ou gás previne a contaminação cromática durante a moagem.

No Brasil, o cimento Portland branco é regulamentado pela NBR 12989 (ABNT, 1993), dividindo-se em dois tipos: estrutural e não estrutural. O cimento Portland branco estrutural possui classes de resistência de 25, 32 e 40 MPa, aplicado para fins arquitetônicos. Já o Portland branco não estrutural não possui indicação de classe e é utilizado principalmente no rejuntamento de peças e revestimentos.

A Tabela 1 apresenta a produção anual de cimento Portland branco (CPB), de acordo com o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC), até o ano de 2008. A partir deste ano o Brasil deixou de produzir cimento Portland branco. No entanto, a importação de CPB vem crescendo desde então. Conforme a SNIC (2012), no ano de 2012 o Brasil importou aproximadamente 171 milhões de toneladas de CPB.

Tabela 1 - Produção anual de CPB no Brasil.

Ano	Produção (em 1.000 toneladas)
2005	96
2006	93
2007	115
2008	86

Fonte: SNIC (2012).

No processo de produção do cimento branco a presença de Fe_2O_3 é indesejada pois a coloração avermelhada típica desse elemento afeta a cor final. Além disso, procura-se evitar outros elementos como Manganês, Cromo e Titânio, fazendo com que sejam adotadas temperaturas mais elevadas para a queima do clínquer, modificando a dureza dos nódulos e, aumentando o tempo de moagem (KIRCHHEIM et al., 2011).

Como consequência dessas medidas, o custo de produção dos cimentos brancos estruturais se eleva, afetando seu preço final, podendo chegar ao triplo como indicam Mehta e Monteiro (2008) e Hamad (1995).

De acordo com Fonseca e Nunes (1998) entre as características físicas, existem duas diferenças básicas entre o cimento branco e os convencionais cinzas, diretamente relacionadas entre si: finura e início de pega. Como, com o aumento da superfície específica a alvura de um material tende a aumentar, os cimentos brancos são, em geral, moídos mais finamente. Como consequência, se tornam mais reativos em contato com a água porque suas partículas se hidratam mais rapidamente, implicando diretamente no ganho de resistência mecânica nas idades iniciais. Por outro lado, a quantidade de água necessária para atingir uma determinada trabalhabilidade é maior, o que, caso não sejam tomadas medidas alternativas, poderá acarretar em aumento da porosidade e da retração plástica do concreto. Os autores acrescentam que o consumo de cimento branco, de forma similar ao que acontece em concretos aparentes, geralmente é superior ao utilizado em concretos convencionais, já que o teor de finos da mistura deve ser alto para garantir bom acabamento superficial.

Wolf (2010) salienta que os cimentos brancos são mais finos que os cimentos cinza não apenas porque seu clínquer é moído em maior intensidade, mas essencialmente porque possuem altos teores de calcário em substituição de parte do clínquer. Este é adicionado para aumentar a brancura do cimento, além de imprimir características usuais aos cimentos compostos de calcário, isto é, menor exsudação e diminuição do teor de clínquer (diminuindo o custo de produção).

Entre as características químicas, Hamad (1995) verificou que, devido ao alto teor de C_3A e baixo teor de C_4AF , o tempo de pega do cimento branco é mais curto quando

comparado ao cimento cinza, desprendendo grande quantidade de calor. O estudo realizado por Benitez et al (2002) analisou o calor de hidratação de argamassas moldadas com cimento branco e cinza. Para as argamassas produzidas com cimento branco, os autores encontraram valores de calor de hidratação maiores (acima de 31 joules/gh) e em menores idades (seis horas de hidratação), quando comparados a argamassas de cimento cinza (28 joules/gh com aproximadamente dez horas de hidratação), ambas sem o uso de aditivo retardador de pega.

Uma comparação entre a composição média do cimento cinza e do cimento branco pode ser visualizada na Tabela 2. Pode-se notar que, para manter a brancura da cor final, o teor de ferro do cimento branco é reduzido com conseqüente aumento do teor de C_3A .

Tabela 2- Compostos principais do cimento Portland.

Composto	Abreviação	Teores %	
		CP cinza	CP branco
Silicato tricálcio	C_3S	50 - 70	51
Silicato dicálcio	C_2S	15 - 30	26
Aluminato tricálcio	C_3A	05 - 10	11
Ferro aluminato tetracálcio	C_4AF	8 - 15	1

Fonte: Neville (1997).

Gobbo, Cincotto e Quarcioni (2007) acrescentam que os principais constituintes do CPB são a alita, a belita e o C_3A , e as adições mais usadas são a calcita, o sulfato de cálcio e a escória de alto-forno.

Em concretos com o mesmo proporcionamento, no que se refere às propriedades mecânicas, o cimento branco apresenta características similares aos cimentos convencionais. Kirchheim (2003) apresenta um estudo comparativo entre diferentes cimentos Portland branco estrutural e o CP-V ARI, demonstrando que o cimento branco possui resistência similar a este tipo de cimento cinza. Hamad (1995) realizou estudo comparativo entre o cimento branco e o cimento convencional, em que os concretos produzidos com cimento branco apresentaram valores superiores de resistência à compressão.

A Tabela 3 apresenta um resumo das características mais importantes dos principais compostos do cimento Portland. Através do conhecimento das reatividades relativas dos produtos de hidratação dos compostos individuais é possível compreender a evolução das propriedades no concreto e especificar cimentos com características especiais, como o CPB.

Tabela 3 - Principais componentes do cimento Portland e suas características.

Composição aproximada	3CaO SiO₂	β2CaO SiO	3CaO Al₂O₃	4CaO Al₂O₃Fe₂O₃
Fórmula abreviada	C ₃ S	βC ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Nome comum	Alita	Belita	-	Fase Ferrita
Velocidade de reação com água	Rápida	Lenta	Rápida	Moderada
Contribuição para a resistência:				
- nas primeiras idades	Boa	Boa	Boa	Boa
- nas últimas idades	Boa	Média	Média	Média
Calor de hidratação	Médio	Baixo	Alto	Médio

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

2.1.1.2 Agregados

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os agregados por serem relativamente baratos e não entrarem em reação química com a água têm sido tratados como material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido a uma melhor compreensão do papel desempenhado pelos agregados na determinação de muitas propriedades do concreto, esta visão vem sendo questionada.

As características relevantes do agregado na composição do concreto incluem: porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes. Essas características são resultado da composição mineralógica da rocha fonte, das condições de exposição a que a rocha foi submetida antes de produzir o agregado e do tipo de equipamento utilizado para a produção do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na produção de concreto colorido, não é o agregado que é pigmentado, e sim a pasta de cimento que o envolve. Segundo Fonseca e Nunes (1998), como o agregado graúdo não é visível na superfície do concreto, tem um papel menos relevante e pouca influência sobre a cor. Porém, é possível que os grãos do agregado graúdo de cor intensa não sejam totalmente cobertos pela pasta, sendo a cor final do concreto afetada. Este efeito se torna ainda mais visível quando o produto é exposto às intempéries, à medida que as partículas de agregado se tornam visíveis devido ao desgaste da superfície (LANXESS, 2002). Por essas razões, o concreto cromático exige uma dosagem adequada e maior controle dos parâmetros de execução que influenciam o acabamento superficial.

Na obtenção de uma superfície de concreto lisa e homogênea é necessário o uso de finos na mistura. Estes finos podem ser compostos pelos agentes pigmentantes. Isto se dá pela ocorrência do efeito parede, ou seja, pelo mecanismo no qual a argamassa concentra-se na superfície e os finos acabam definindo a aparência superficial do material (PASSUELO, 2004). Nos concretos de cor cinza, a opacidade desta camada é facilmente conseguida, sendo

constituída por partículas de cimento cinza. Mas em concretos produzidos com cimento branco, a espessura da camada de pele deverá ser superior e faz todo sentido o uso de fíler, por razão de ordem técnica ou econômica, pois uma excessiva dosagem em cimento implica maior calor de hidratação e maior risco de fissuração (FONSECA; NUNES, 1998).

Agregados frequentemente utilizados no estado do Rio Grande do Sul, como os de origem basáltica ou granítica, têm tonalidades escuras e podem conter material pulverulento ou contaminação por argila. Portanto, seu uso na produção de concretos cromáticos se torna discutível (PASSUELO, 2004). Com o intuito de atender a demanda de cor a opção por agregados mais claros torna mais fácil o controle da aparência superficial. Neste contexto se encaixam como opções de uso os agregados provenientes da britagem de rochas calcárias (KIRCHHEIM et al., 2011).

Mehta e Monteiro (2008) observam que a granulometria, dimensão máxima, forma e textura do agregado são fatores que influenciam na retração por secagem mas destacam que, o módulo de elasticidade do agregado é o fator mais importante quanto a essa propriedade. Powers (1968) *apud* Mehta e Monteiro (2008), investigou a retração por secagem de corpos de prova de relação água/cimento de 0,35 e 0,5, contendo dois tipos diferentes de agregados. Como mostra a Figura 9, a razão entre a retração do concreto para a retração da pasta de cimento pode ser exponencialmente relacionada ao volume de fração do agregado no concreto.

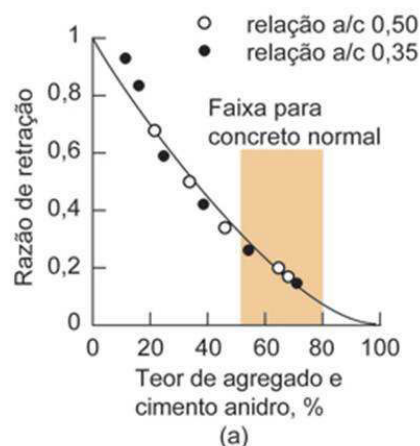


Figura 9 - Influência do teor de agregado sobre a retração por secagem.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Fonseca e Nunes (1998) ressaltam a importância da utilização de agregados bem lavados e de características homogêneas, assim como prever-se a armazenagem de quantidade de material suficiente como forma de garantir a homogeneidade.

2.1.1.3 Aditivos

Na produção do concreto colorido deve-se manter uma relação constante entre água e material cimentício, uma vez que variações no teor de água podem resultar em uma mudança visual na cor da mistura (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA), 1999).

Dessa forma, na produção de concretos cromáticos os aditivos desempenham importante papel considerando-se que as características específicas do cimento Portland branco, do emprego de agregados artificiais e da incorporação de finos e pigmentos, alteram a trabalhabilidade tendendo a ser menor que a de um concreto cinza de mesma relação a/c (NERO; NUNES, 1999).

O tipo de aditivo mais utilizado em concretos brancos é o superplastificante (PASSUELO, 2004), um surfactante que, quando adsorvido pelas partículas de cimento, confere forte carga negativa, que ajuda a diminuir a tensão superficial da água circundante e eleva acentuadamente a fluidez do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2008) consequentemente reduzindo a demanda de água (PIOVESAN, 2009). São também chamados de redutores de água de alta eficiência, porque são capazes de reduzir de três a quatro vezes a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto comparado aos aditivos redutores normais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Fonseca e Nunes (1998) comentam que os aditivos utilizados na fabricação de concreto com cimento branco devem ser cuidadosamente avaliados para não afetarem a cor. Em termos cromáticos, os aditivos com formulações à base de carboxilatos, melamínicos ou policarboxilatos são mais indicados por apresentarem cor clara (KIRCHHEIM et al., 2011).

2.1.1.4 Pigmentos

O termo corante é utilizado para designar substâncias que conferem cor, solúveis na matriz, que perde a sua identidade estrutural no meio, formando uma mistura homogênea (solução). Os pigmentos, ao contrário, conferem cor pela dispersão de suas partículas coloridas no meio, formando uma mistura heterogênea (suspensão) (COSTA, 2009).

Do ponto de vista técnico, o concreto colorido e o convencional podem ser considerados idênticos, visto que o pigmento adicionado ao concreto pode ser classificado como um agregado fino (fíler) (HARTMANN; BENINI, 2011). Os pós de pigmentos são em geral mais finos do que o cimento, de modo a se distribuírem uniformemente dentro da massa cimentícia. Consequentemente é provável que seja maior a proporção de água na mistura e

suas variações dependem do tamanho e forma da partícula (LEE, LEE, YU, 2003; LÓPEZ et al., 2009).

De acordo com Bondioli et al. (1998), a tendência de um pigmento a solubilizar-se na matriz durante a aplicação depende da área superficial específica e consequentemente, da sua distribuição granulométrica. Assim, quanto mais fino é o pigmento, maior é a sua tendência de se solubilizar na matriz. Para a maior parte das aplicações industriais, as partículas de pigmento devem ter dimensões entre 0,1 e 10 μm .

Conforme Costa (2009), os pigmentos podem ser divididos em dois grupos gerais: orgânicos e inorgânicos. As propriedades gerais são muito diferentes entre os dois grupos. Enquanto os orgânicos possuem uma vasta gama de tons muito brilhantes e elevado poder de coloração, os inorgânicos apresentam excelente estabilidade química e térmica e menor toxicidade para o homem e para o ambiente (BONDIOLI; MANFREDINI; OLIVEIRA, 1998).

Os pigmentos inorgânicos ainda dividem-se em naturais e sintéticos. Os naturais são encontrados na natureza e por muitos anos foram os únicos pigmentos conhecidos e utilizados, apresentam ótimas propriedades, capacidade de coloração e baixo custo, sendo os óxidos de ferro os mais utilizados. Os pigmentos sintéticos, preparados pelo homem mediante procedimentos químicos, podem ser produzidos com elevado grau de pureza e uniformidade, apresentam maior estabilidade térmica e química, são mais caros que os pigmentos orgânicos e podem ser estudados e formulados para originarem colorações dificilmente conseguidas com pigmentos inorgânicos naturais (BONDIOLI; MANFREDINI; OLIVEIRA, 1998).

Diversos autores da bibliografia estudada (COELHO, 2000; BONDIOLI, MANFREDINI E OLIVEIRA, 1998; LANXESS, 2002; LEITE, 2008) apontam que os pigmentos devem ter as seguintes características:

- Ser inertes aos demais componentes do concreto ou argamassa;
- Assegurar e manter a cor original;
- Apresentar boa resistência à luz e ação das intempéries;
- pH estável;
- Insolúvel em água;
- Misturar-se facilmente com o cimento e os finos do concreto.

Coelho (2000) ressalta que apenas os pigmentos inorgânicos, e entre eles unicamente os óxidos, cumprem os requisitos anteriormente expostos. Os mais importantes são aqueles obtidos a partir de óxidos de ferro, cujas estruturas correspondem aos minerais hematita, magnetita e goethita (OLIVEIRA; FABRIS; PEREIRA, 2013).

Como os pigmentos inorgânicos utilizados em compósitos de cimento possuem partículas muito pequenas e insolúveis, eles tornam-se uniformemente distribuídos durante o processo de mistura e como resultado, os compósitos cimentícios adquirem coloração uniforme (LEE; LEE; YU, 2005).

Quando se prepara uma mistura de concreto com pigmento observa-se que a intensidade da cor, inicialmente, aumenta de forma linear até chegar a um ponto que o aumento da tonalidade é praticamente nulo (PORTER, 2011; COELHO, 2000). Este ponto chama-se saturação. Por isso, o poder de coloração do pigmento é uma característica essencial quando se avalia custo/desempenho, uma vez que se pode chegar ao efeito cromático desejado com uma mínima quantidade da substância colorante, sem incorrerem problemas de resistência no concreto devido a grande quantidade de finos na mistura (COELHO, 2000).

Utilizando-se produtos com alto poder de pigmentação, os percentuais de adição são reduzidos e praticamente não alteram as propriedades do concreto (HARTMANN; BENINI, 2011). O poder de coloração dos pigmentos depende da sua natureza, composição mineralógica e química, processo de fabricação, pureza, área superficial específica, forma e tamanho das partículas (GUTIÉRREZ; BAENA; TOBÓN, 2009). Partículas mais finas têm maior poder de tingimento. Pigmentos de óxido de ferro naturais, embora compartilhem da mesma fórmula química, têm partículas maiores e contêm grande quantidade de impurezas, conseqüentemente, têm poder de tingimento mais baixo do que os sintéticos (DUNNOUS, 1997).

Para o controle da intensidade da cor, são recomendados em média teores entre 3% e 5% de pigmento em relação à massa cimentícia (HARTMANN; BENINI, 2011). A ASTM C979:2010 recomenda que a dosagem de pigmento não deve ser superior a 10% em relação à massa de cimento. Lee, Lee e Yu (2003) sugerem que a adição de pigmentos inorgânicos à base de óxido de ferro na produção de blocos intertravados de concreto deve ser inferior a 4% sobre a massa cimentícia.

2.1.2 Efeito dos pigmentos nas propriedades do concreto

Sendo os pigmentos compostos tipicamente por partículas de tamanhos inferiores a 1 µm, até dez vezes menores que as partículas de cimento, acabam por influenciar nas condições de produção do concreto.

2.1.2.1 Estado fresco

De acordo com Coelho (2000), no estado fresco, a redução da trabalhabilidade é a propriedade mais influenciada pela adição de pigmentos à mistura, tanto pelo tamanho de suas partículas como também pela sua forma. O autor constatou que a menor dimensão e a forma esférica das partículas do pigmento preto proporcionam um alto poder de pigmentação e maior trabalhabilidade quando comparado ao pigmento amarelo, que possui forma acicular, exigindo maior quantidade de água na mistura.

Lee, Lee e Yu (2005) verificaram que a fluidez das argamassas com adição de pigmentos inorgânicos rapidamente diminui com o aumento do teor dos pigmentos vermelho e amarelo, aumentando a demanda de água ou o emprego de aditivo superplastificante. Com o uso de pigmentos verde e preto quase não houve alterações na fluidez das argamassas. Os autores complementam que em virtude da finura e da forma das partículas de cada pigmento, os mesmos exercem influência sobre a resistência, secagem, retração e durabilidade dos concretos. Desta forma torna-se necessária a caracterização da microestrutura das partículas de pigmento uma vez que cores diferentes apresentam morfologia de partículas diferentes.

Aguiar (2006) relata uma mudança significativa na trabalhabilidade do concreto de cimento Portland branco estrutural com a adição de pigmentos, sendo necessário o acréscimo de aditivo superplastificante.

2.1.2.2 Estado endurecido

No estado endurecido, estudos demonstram que a resistência à compressão do concreto em geral não sofre diminuição significativa ao se incorporar pigmentos nas doses recomendadas e ao manter-se a consistência original com um ajuste da relação a/c ou com o uso de aditivos. Piovesan (2009), incorporando dois tipos de pigmentos ao concreto, constatou um pequeno, porém significativo, aumento na resistência à compressão, possivelmente associado ao efeito físico da adição do pigmento. Porém o tipo de pigmento adicionado ao concreto não apresentou influência significativa sobre a resistência à compressão e absorção capilar.

Coelho (2000) afirma que a influência da adição de pigmentos ao concreto em relação à durabilidade está diretamente ligada à sua permeabilidade. Seu estudo avaliou as variações de cor e durabilidade de concretos produzidos com pigmentos inorgânicos, submetidos a diferentes estados de exposição ambiental. Os resultados demonstram que, em relação à absorção capilar, a incorporação de pigmentos é insignificante, frente à influência da relação *a/c*. A incorporação de pigmento representa um aumento da porosidade. Todos os concretos produzidos com relação *a/c* 0,67 apresentaram valores de porosidade superiores aos de relação *a/c* 0,52, independente do tipo de pigmento utilizado. Após um ano, os corpos de prova expostos à intempérie ou a ação de ciclos de umidade e secagem apresentaram valores de porosidade superiores aos seus respectivos resultados iniciais (35 dias).

Carvalho e Calaveira (2002) investigaram a influência do tipo de cimento (branco e cinza), da relação *a/c* e do tipo de pigmento incorporado ao concreto, através da exposição de corpos de prova em diferentes ambientes (câmara de cura, ciclos de molhagem e secagem, radiação ultravioleta e à intempérie), durante um período aproximado de um ano. Os resultados com relação à permeabilidade indicam que o concreto de cimento branco é mais permeável que o produzido com o cimento cinza.

Silva et al. (2012) realizaram estudo sobre a influência da incorporação de pigmentos líquidos em diversas cores sobre propriedades no estado fresco e resistência à compressão em argamassas e concretos. No estado fresco, a incorporação de pigmentos conduziu sempre a uma diminuição do diâmetro de espalhamento, provavelmente explicada pelo fato de a incorporação de pigmento líquido ter sido efetuada através da substituição de igual volume de água. Os concretos produzidos com pigmentos não apresentaram diminuição na resistência à compressão, no caso do concreto pigmentado vermelho, obteve-se um ganho de 20% em relação ao concreto de referência, conforme apresentado na Figura 10.

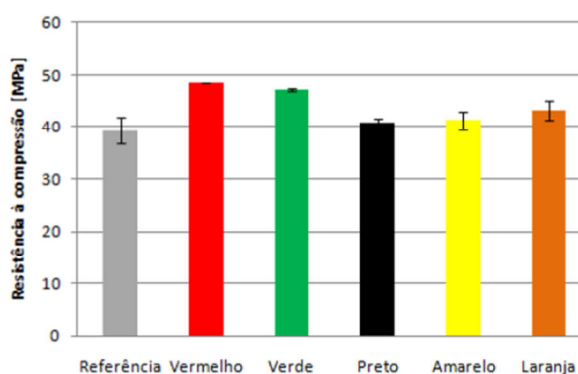


Figura 10 - Resistência à compressão de concretos pigmentados, aos 7 dias.

Fonte: Silva et al. (2012).

Estudos em concreto autoadensável colorido foram desenvolvidos por Corinadelsi et al. (2012), com adição de dois tipos de pigmentos inorgânicos. No estado fresco, não se observou nenhuma mudança significativa no comportamento reológico dos concretos produzidos com os pigmentos. Nos ensaios de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, a adição de pigmentos representou uma pequena perda de resistência quando comparado à referência, porém nunca superior à 3 MPa (aproximadamente 9%).

2.1.2.3 Durabilidade da cor no concreto

Os materiais tendem a sofrer algum tipo de alteração na medida em que são expostos à ação do meio a qual se encontram, seja de origem, química, física ou biológica. Os aspectos particulares de cada ambiente estabelecem diferentes níveis de agressividade, os quais, associados às características do material, determinarão sua durabilidade (ABITANTE, 2004).

Os principais fatores que afetam a estabilidade da cor no concreto pigmentado são sua qualidade e o ambiente a que será exposto. A adequada seleção dos agregados e cimento empregados, as condições de cura e compactação são determinantes para a obtenção da estabilidade colorimétrica. A radiação solar, a umidade, a temperatura e os agentes poluentes são os principais fatores responsáveis pela deterioração do concreto colorido (COELHO, 2000).

Em relação à durabilidade, Coelho (2002) afirma que a influência da adição de pigmentos ao concreto está relacionada ao aumento do grau de permeabilidade do mesmo, devido a maior quantidade de água exigida, consequência do aumento da superfície específica e da quantidade de finos na mistura.

As eflorescências são manchas na superfície do material de depósitos cristalinos que migram do concreto ou argamassa, como hidróxido de cálcio solúvel e dentro de um curto período de tempo combina-se com o dióxido de carbono atmosférico formando carbonato de cálcio insolúvel, geralmente branco ou cinzento. Entre as principais causas de eflorescências, destacam-se a cura ineficiente, baixa compactação e as condições atmosféricas (NORSUZAILINA; SININ, 2012). Hartmann e Benini (2011) creditam o aparecimento de eflorescências em pisos intertravados coloridos a três fatores: compostos solúveis do cimento hidratado, permeabilidade elevada do concreto (alta relação a/c) e umidade elevada do meio.

2.1.3 Execução do concreto colorido

O informe n° 5 do (CIB, 1982) define a expressão “concreto de cor uniforme e sem defeitos na superfície” como sendo o concreto cuja superfície apresenta variações de cor esteticamente aceitáveis, isenta de manchas ou superfícies onde os defeitos são insignificantes.

De acordo com Coelho (2000), a relação a/c afeta a capacidade de aderência dos agregados, incide diretamente na porosidade da pasta e na cor do concreto e, conseqüentemente, na sua resistência estrutural.

Deve-se evitar concretagens em temperatura ambiente superior a 35°C, pois, principalmente em dias de temperatura elevada, a reatividade do cimento branco pode ocasionar problemas relacionados ao rápido endurecimento e perda de trabalhabilidade (KIRCHHEIM et al., 2011).

2.1.3.1 Fôrmas e desmoldagem

As fôrmas de concretos aparentes apresentam grande importância pois sua seleção afeta o aspecto final do concreto (PORTER, 2011). O desenvolvimento dos sistemas de fôrma e dos materiais para o efeito desejado consiste em tema vital para o concreto aparente (NERO; NUNES, 1999).

Em qualquer dos sistemas a limpeza da superfície do molde é fundamental, pois resíduos ou outras impurezas ficarão registrados permanentemente no concreto. Muito importante também é a garantia de estanqueidade. A perda de água traz conseqüências desagradáveis no concreto aparente sendo então imprescindível a selagem das juntas entre os painéis, com selantes à base de silicone ou poliuretano, e a colocação de fitas de borracha em cantos, bases, quinas e juntas de concretagem (NERO; NUNES, 1999). Marcas indesejáveis são geradas no desencontro das fôrmas, ocasionando a fuga de pasta, que compromete o acabamento superficial além de facilitar o aparecimento de zonas com falhas de concretagem (KIRCHHEIM et al., 2011).

Fôrmas metálicas permitem a concretagem de peças arredondadas, e a sua maior resistência e rigidez asseguram uma maior capacidade para absorver os impulsos do concreto fluido, evitando-se deformações nas peças, especialmente as de maior dimensão. A durabilidade da fôrma metálica é outra vantagem evidente. Entretanto, a limpeza e manutenção deste tipo de fôrma são difíceis, sendo notório o efeito negativo de sua oxidação

superficial. As contaminações tingem a superfície em profundidade de até 2 mm, deixando marcas difíceis de apagar (FONSECA; NUNES, 1998).

Com as fôrmas de madeira, a aparência dos nódulos pode ser obtida moldando-se o concreto em madeira jateada ou estriada. Madeira não tratada pode ser utilizada para produzir um concreto com efeito rústico. As fôrmas de revestimento de plástico disponíveis comercialmente podem ser de materiais rígidos como as folhas de poliestireno, plástico reforçado com fibras, ou de espuma flexível, como as de poliuretano (HARTMANN; BENINI, 2011).

O efeito no aspecto estético de fôrmas de diferentes materiais (aço, madeira e vidro) foi testado por López et al. (2009) em argamassas coloridas produzidos com cimento branco e cinza. Observaram-se mudanças em alguns parâmetros colorimétricos de acordo com o material da superfície. A luminosidade foi menor em moldes de madeira e a saturação tende a ser maior em fôrmas de aço.

Como desmoldante, deve-se optar por algum tipo que não interfira no acabamento superficial do concreto como, por exemplo, os desmoldantes à base de cera (KIRCHHEIM et al., 2011).

A desmoldagem antecipada poderá causar arrancamentos e quebra de arestas e cantos. Entretanto, a desforma nas primeiras idades evita o manchamento do concreto pelas fôrmas (KIRCHHEIM et al., 2011). Assim, a desmoldagem deve ser rigorosamente controlada, em função da maturidade do concreto aplicado (NERO; NUNES, 1999). Hartmann e Benini (2011) aconselham a retirada das fôrmas em aproximadamente 24 horas para evitar a exposição do revestimento ao calor prolongado pela hidratação do cimento, acarretando em uma cor mais uniforme à superfície. Entretanto, essa prática pode facilitar a perda de água do concreto para o meio, possivelmente prejudicando a sua cura e aumentando o fenômeno de retração.

2.1.3.2 Mistura e lançamento

Sendo os pigmentos partículas extremamente finas, devem ser misturados adequadamente para se dispersarem ao concreto. Para isso os equipamentos recomendados são os misturadores forçados de contra corrente, de eixo vertical simples ou planetário e os misturadores de eixo horizontal, pois proporcionam a homogeneização adequada (HARTMANN; BENINI, 2011).

Pigmentos e óxido de ferro devem ser completamente molhados com o objetivo de desenvolver o potencial de cores, sendo que pigmentos com baixo nível de pH demoram mais tempo para molhar. Quando misturado em tempo suficiente e nas condições adequadas, todos os eventuais aglomerados de partículas se quebram a um tamanho menor e o pigmento atingirá sua força máxima de tingimento (DUNNOUS, 1997).

Hartmann e Benini (2011) e Dunnous (1997) indicam basicamente a mesma sequência de colocação dos materiais que, segundo os autores, apresenta bom desempenho na mistura final do concreto:

- Pré mistura a seco do pigmento e agregado;
- Mistura complementar após a adição do cimento;
- Mistura a úmido após a adição de água.

Dunnous (1997) acrescenta que a mistura inicial de agregado e areia junto ao pigmento deve assegurar o espalhamento uniforme da cor, agindo como uma moagem média, ajudando na separação dos aglomerados de partículas presentes.

Para facilitar a liberação do ar aprisionado devem-se ter cuidados referentes à vibração entre camadas, limitando a formação de bolhas de ar e poros superficiais, além de evitar manchas (KIRCHHEIM et al., 2011).

2.1.3.3 Cura e proteção superficial

A cura apropriada requer a manutenção das condições de temperatura e umidade favoráveis ao desenvolvimento das propriedades desejadas. Água parada ou corrente pode afetar a cor, filmes plásticos podem causar manchas, e algumas curas químicas podem descolorir o concreto (HARTMANN; BENINI, 2011).

Todo material exposto à ação ambiental sofre um processo de envelhecimento natural. A maneira como está sendo utilizada e as condições de exposição às intempéries determinam como a estrutura como um todo se transforma ao longo do tempo (PASSUELO, 2004). Em ambientes agressivos, pode ser necessária a aplicação de algum sistema de proteção superficial a fim de atingir uma durabilidade adequada (KAZMIERCZAK, 2011).

Confirmando Fonseca e Nunes, Passuelo (2004) julga quase obrigatória a utilização de sistemas de proteção, já que o controle estético nestas estruturas é fundamental, salientando que os mesmos são bastante vulneráveis à fixação de partículas e ao

desenvolvimento de fungos e mofos dependendo das características de porosidade e textura superficial.

É de conhecimento geral que o grande causador de manifestações patológicas nos materiais de construção são os mecanismos de transporte de água. Dentro dos sistemas existentes, Kazmierczak (2011) cita os hidrofugantes de poro aberto que penetram nos poros capilares da superfície do concreto e alteram o ângulo de contato entre as paredes desses poros e a água, tornando o concreto hidrorrepelente. Impedem a penetração de água por capilaridade e, como não formam película, permite a passagem de vapor de água e gases, sem alterar a aparência superficial. Já os vernizes, formam uma película contínua, semiflexível e de baixa permeabilidade, impedindo ou minimizando o contato de elementos agressivos com a superfície do concreto.

2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO PIGMENTOS

De acordo com Leite (2008), na escolha e aplicação de um pigmento devem ser considerados fatores como a capacidade de coloração, a uniformidade da cor, o custo, a compatibilidade com os componentes do sistema usado, a estabilidade durante o processo e a granulometria.

Prim et al. (2011) destacam que a consciência ambiental é vista com grande interesse pela indústria, levando ao desenvolvimento de pigmentos com alta estabilidade e tons intensos. Estes pigmentos também devem atender aos requisitos tecnológicos e ambientais. Por sua vez, isto pode levar ao desenvolvimento de processos mais econômicos e eficientes, permitindo assim a produção de novos pigmentos com cores intensas. Estes resultados podem ter lugar principalmente por melhorar as características dos pigmentos já utilizados. Muitos dos estudos desenvolvidos para a reutilização de resíduos industriais como pigmentos incluem a reutilização de resíduos provenientes dos processos da indústria siderúrgica.

Uma solução que tem se mostrado interessante é a incorporação de resíduos em produtos, processados a altas temperaturas, uma vez que as mudanças de fases que ocorrem durante o tratamento térmico permitem a estabilização dos elementos potencialmente perigosos. Dentro deste panorama encaixa-se o setor de tratamentos superficiais, definido como um conjunto de processos e métodos físico-químicos aplicados a peças metálicas, e eventualmente não metálicas, a fim de conferir-lhes algumas propriedades superficiais como durabilidade, resistência, proteção e/ou aspecto estético (COSTA, 2009).

Exemplos dessas aplicações são relatados em estudos da indústria cerâmica, revelando vantagens em algumas etapas do processo produtivo e ganhos energéticos, sem que ocorram modificações significativas nas características do produto final.

2.2.1 Estudos de resíduos como pigmentos

Montedo et al. (2006) realizaram estudo do aproveitamento de carepa de aço como matéria-prima para a elaboração de um pigmento encapsulado, a base de óxido de ferro e sílica, destinado à indústria cerâmica. O pigmento cerâmico encapsulado a base de hematita (5% em peso) demonstrou potencial para aplicação em vidrados cerâmicos e massas para grês porcelânico.

A partir da mistura, calcinação e moagem conjunta de lama vermelha e resíduo caulínico, Lima et al. (2005) avaliaram a viabilidade técnica de produção de um novo tipo de pigmento pozolânico. A produção de pigmentos com atividade pozolânica faz com que os mesmo possam ser utilizados em maiores quantidades, possibilitando a redução no consumo de cimento sem que haja redução na resistência à compressão. Os autores também observaram que houve uma diminuição na ocorrência de eflorescências, considerada a principal patologia em concretos e argamassas coloridos.

Costa (2009) avaliou a viabilidade de incorporação de lamas geradas pelos processos de anodização, de niquelagem e cromagem de torneira e da decapagem química de aços de uma trefilaria, utilizadas por si só, ou em conjunto com matérias-primas comerciais, para a obtenção de pigmentos cerâmicos, demonstrando ser tecnicamente viável.

Prim et al. (2011) estudaram o aproveitamento de subprodutos industriais, ricos em ferro, na síntese de pigmentos encapsulados em matriz de sílica. Os resultados mostraram que o desenvolvimento da cor torna-se efetivo quando o pigmento é incorporado em massa porcelânica, por se tratar de um meio menos agressivo, não interferindo nas características microestruturais do material pigmentado. Os autores acrescentam ser necessário o conhecimento de propriedades como o teor de fonte cromófora, o diâmetro médio das partículas e as fases presentes.

Lodo proveniente da indústria de galvanoplastia foi utilizado na pesquisa de Boss et al. (2011), incorporando-o em diferentes percentuais em uma fórmula padrão de pigmento cerâmico industrial constituído majoritariamente de Zn, Fe e Cr. Os pigmentos obtidos foram aplicados em esmaltes cerâmicos para análise visual e colorimétrica, onde apresentou bons resultados com adição de até 15% do resíduo industrial.

O estudo de Hajjaji et al. (2011) relatou a utilização de lamas geradas no tratamento de efluentes de diversas atividades na formulação de estruturas de pigmentos inorgânicos.

A pesquisa de Marcello (2013) consistiu na caracterização física, química e no beneficiamento do resíduo proveniente das cinzas de incineração de aparas de couro para a recuperação do óxido de cromo como um mineral industrial aplicável na produção de pigmento cerâmico. Amostras constituídas pelo resíduo bruto, pelo resíduo beneficiado e por um padrão comercial à base de óxido de cromo foram aplicadas na coloração de esmalte com posterior aplicação em revestimentos cerâmicos. Os resultados demonstram que a metodologia utilizada no tratamento do resíduo permitiu a concentração do óxido de cromo com melhorias nas propriedades colorimétricas, obtendo-se pigmentos com variações de cor do verde ao marrom. A cominuição em moinho de bolas mostrou-se eficiente para o enquadramento do material na faixa granulométrica desejada.

Vernilli et al. (2014) avaliaram a utilização da solução aquosa de cloreto ferroso gerado nas Linhas de Decapagem Contínua na Usina Presidente Vargas da CSN na síntese de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita (FeOOH), como uma nova rota de síntese de pigmentos inorgânicos. De acordo com os resultados dos experimentos realizados em escala laboratorial, a síntese dos pigmentos à base de óxido de ferro não apresentou nenhuma adversidade com relação à sua obtenção e caracterização. Conclui-se ainda que a produção de pigmentos inorgânicos atóxicos, além de consistir em uma solução ecologicamente correta, permitindo a substituição dos pigmentos inorgânicos de metais pesados críticos, como chumbo, molibdênio, cromo e cádmio, proporciona ainda um produto com propriedades reológicas, colorantes e de durabilidade compatíveis com os pigmentos oferecidos no mercado.

Mesmo com o crescente uso do concreto cromático, o número de trabalhos publicados que apresentam o uso deste material associado à incorporação de resíduos ainda é pouco explorado. Visto os bons resultados apresentados nas pesquisas da indústria cerâmica, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos que avaliem a incorporação de diferentes resíduos industriais, em materiais cimentícios.

2.2.2 Lodo de fosfatização

O lodo de fosfatização é um resíduo gerado no tratamento de efluentes do processo de revestimento fosfático do aço, cujo objetivo é limpar e preparar a superfície

metálica para o uso, prolongando a vida útil (BERSCH, 2011). Para isso, o fosfato de manganês é utilizado, pois proporciona uma melhora nas propriedades lubrificantes de peças deslizantes, evita que se fundam os metais submetidos a cargas elevadas, e elimina, quimicamente, pequenas irregularidades deixadas pelas ferramentas (ALTAFIN et al., 2004).

A Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais, realizou o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais através da Fundação Estadual do Meio Ambiente – (FEAM, 2013). Nele, constam as tipologias industriais que apontaram a geração do resíduo borra de fosfato entre os dez principais resíduos gerados em seu processo produtivo. O único setor a apresentar a borra de fosfato entre os principais resíduos foi a Indústria de Madeira e Mobiliário, pois diversas atividades avaliadas são relativas à móveis de metal e possuem no seu processo produtivo etapas de tratamento químico superficial, pintura e pintura por aspersão. A geração do LF neste setor foi de 460,18 t, referente a 0,18% de todo resíduo sólido industrial gerado, referente ao período de janeiro a dezembro de 2012.

Entretanto, tendo em vista que a geração do resíduo borra de fosfato está relacionada com a atividade de pintura, pesquisou-se também a possibilidade dele ter sido incorporado por algumas empresas como “resíduos e lodos de tinta da pintura industrial”. Sendo assim, a geração efetiva do resíduo no Estado de Minas Gerais passa a ser maior do que a indicada, já que este item aparece na Indústria de Matérias Plásticas, sendo responsável por 3,18% (130,30t) dos resíduos sólidos industriais gerados pelo setor no ano de 2012.

A caracterização mineralógica do LF foi realizada por Brehm et al (2013) ao verificar a estabilização do resíduo em matriz cerâmica vermelha e concretos de cimento Portland. O difratograma de raios X da amostra de LF utilizado apresentou picos de Óxido de Cálcio, Calcita, Sulfato Fosfato de Sódio, Manganocalcita, Fosfato de Ferro e Fosfato de Cobre. Entretanto os autores salientam que o amorfismo apresentado pela amostra dificulta a identificação das fases por essa técnica analítica e que se esperava identificar fases contendo Zn e Al em virtude da detecção desses elementos na análise química. Provavelmente as fases que contenham esses elementos não foram encontradas por apresentarem um arranjo cristalino não definido.

A influência da adição de 2,5% de LF (em relação à massa de cimento) no tempo de pega do cimento foi objeto de estudo de Brehm et al (2008). Empregando cimento CPV-ARI os autores observaram um aumento no tempo de início e fim de pega (Tabela 4) em

relação à pasta de referência (0% de adição), atribuindo tais resultados à presença de zinco no resíduo.

Tabela 4 - Início e fim de pega do LF.

Teor de LF (%)	0%	2,5%
Início de pega (h:min)	2:58	3:37
Fim de pega (h:min)	4:02	5:22

Fonte: Brehm et al. (2008).

Como a norma NBR 5733 (ABNT, 1991) estabelece como faixa de início e fim de pega entre 1 e 10 horas, há possibilidade de uso para o lodo de fosfatização em cimento. Entretanto, os autores salientam que se deve considerar que o início e fim de pega de um sistema a base de cimento como o concreto, podem ser alterados em função da interação com eventuais contaminações dos agregados e do uso de aditivos químicos.

Brehm et al (2006) estudou um resíduo com teores significativos de zinco adicionando-o à pasta de cimento, observando um retardo na pega. Ao discutir profundamente a questão, a autora sugere que o Zn (zinco) reage preferencialmente com o Ca (cálcio) dos minerais que compõem o cimento competindo com o Si (silício) durante sua hidratação, o que leva ao retardo do tempo de pega.

Algumas aplicações para o LF têm sido estudadas.

Caponero e Tenório (2000) estudaram o comportamento do lodo de revestimento fosfático adicionado à farinha de cimento Portland, sobre o processo de clínquerização. Foram testados teores de adição de 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4 e 5%. Pela difração de raios- X, a análise não mostrou nenhuma modificação significativa no clínquer e foi proporcional à quantidade de lama adicionada, além disso, não foram formadas fases atípicas quando da adição de até 5% de fosfato.

O estudo realizado por Altafin et al. (2004) foi baseado na possibilidade de reaproveitar o LF no preparo de mudas de espécies nativas utilizadas em reflorestamento e recuperação de áreas degradadas. Os resultados obtidos mostram que o resíduo possui alto potencial para utilização em cultivos protegidos, mas são necessários mais estudos para dimensionar a dosagem adequada desse resíduo para ser utilizado como fonte de nutrientes por espécies nativas.

O comportamento da borra adicionada como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos foi tema de estudo de Giffoni e Lange (2005). Os resultados obtidos pelas autoras permitem concluir que para as diferentes formulações testadas, a quantidade de

10% de borra de fosfato usada na substituição da argila para a fabricação dos tijolos é a ideal, recomendando o seu uso como bloco de vedação classe 10. Esta formulação não pode ser considerada inerte pelas normas atualmente em vigor, mas tampouco possui características que a tornam perigosa do ponto de vista ambiental.

Com o objetivo de verificar o emprego de baixo teor do LF (2,5% em relação à massa de cimento) em concreto, Brehm et al. (2008) desenvolveram três traços com diferentes consumos de cimento, com teor de argamassa de 52% e abatimento pré estabelecido de 80 ± 10 mm. Tendo-se o traço referência de maior consumo de cimento, observa-se que o LF levou a um aumento na demanda de água e a relação *a/c* passou de 0,39 para 0,42, o que representa um aumento de 8%. Observou-se que, em média, a adição de LF diminui a resistência à compressão dos concretos estudados pois o consumo de água nestes concretos, em geral, aumenta. Em relação à caracterização ambiental, nenhuma das amostras apresentou lixiviação acima dos limites permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004), não sendo caracterizados como resíduos sólidos Classe I – Perigosos. O ensaio de solubilização indicou que somente ferro foi solubilizado. A caracterização ambiental do co-produto obtido com adição de LF classificou-o como Resíduo Sólido Classe IIA – Não inerte segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), o que não inviabilizaria o seu uso.

O princípio da pesquisa de Lin, Lin e Luo (2009) foi investigar os efeitos da incorporação de lama de fosfato sobre as propriedades de hidratação de eco-cimentos. Os autores observaram que os principais constituintes de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF estavam presentes no clínquer. O aumento do teor de P_2O_5 resultou na formação de C_2S . A resistência à compressão das pastas de cimento com adição de LF obteve valores semelhantes à referência.

O objetivo do trabalho de Brehm et al. (2008) foi avaliar a potencialidade de adição de lodo de fosfatização em cerâmica vermelha. Foram realizados testes em escala laboratorial com as amostras de argila pura (0% adição), e lodo de fosfatização nos teores de 2,5; 5,0 e 7,5% de adição. Com relação às propriedades mecânicas e físicas, os autores confirmam que uma adição de até 5% de lodo de fosfatização no material cerâmico atende as exigências da norma e literatura, considerando as condições experimentais da pesquisa. A caracterização ambiental demonstra que o produto obtido com a adição de 2,5% de lodo de fosfatização no material cerâmico é classificado como Resíduo Sólido Classe II – Não Inerte.

Tendo em vista que o principal componente dos lodos de fosfatização dos trabalhos acima citados é o óxido de ferro e que este é também o responsável pela coloração

dos pigmentos comercializados no mercado, o LF pode se tornar uma opção de estudo como pigmento na busca por matérias primas que substituam ou otimizem os materiais já conhecidos na produção de concretos e argamassas. Desta forma, busca-se à valorização de um subproduto industrial que possui características interessantes para indústria de pigmentação.

2.3 FUNDAMENTOS DE COLORIMETRIA

A cor não é uma característica absoluta de um objeto e sim uma percepção humana provocada pelos estímulos recebidos que depende de aspectos físicos, fisiológicos e psicológicos, sendo por isso um fenômeno psicobiofísico (MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

De acordo com Leite (2008), foi em 1730 que Newton descreveu a decomposição ou dispersão da luz branca (luz solar) num conjunto de cores (púrpura, violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho), tal como se observa no arco-íris, com o auxílio de um prisma, dando origem ao estudo da colorimetria.

Três fatores determinam a cor que um observador percebe: uma fonte de luz, a superfície do objeto e o observador (LEMAIRE; ESCADEILLAS; RINGOT, 2005).

2.3.1 A luz

A luz é uma radiação eletromagnética, estudada pela óptica, ramo da física que se dedica ao seu estudo, produção, propagação, medida e propriedades (COSTA, 2009).

As ondas eletromagnéticas capazes de estimular o sistema visual humano representam uma parte reduzida de todo o espectro eletromagnético (COSTA, 2009) e situa-se entre a radiação ultravioleta e a infravermelha, aproximadamente correspondente ao intervalo entre 400 nm e 700 nm (LEITE, 2008), conforme a Figura 11.

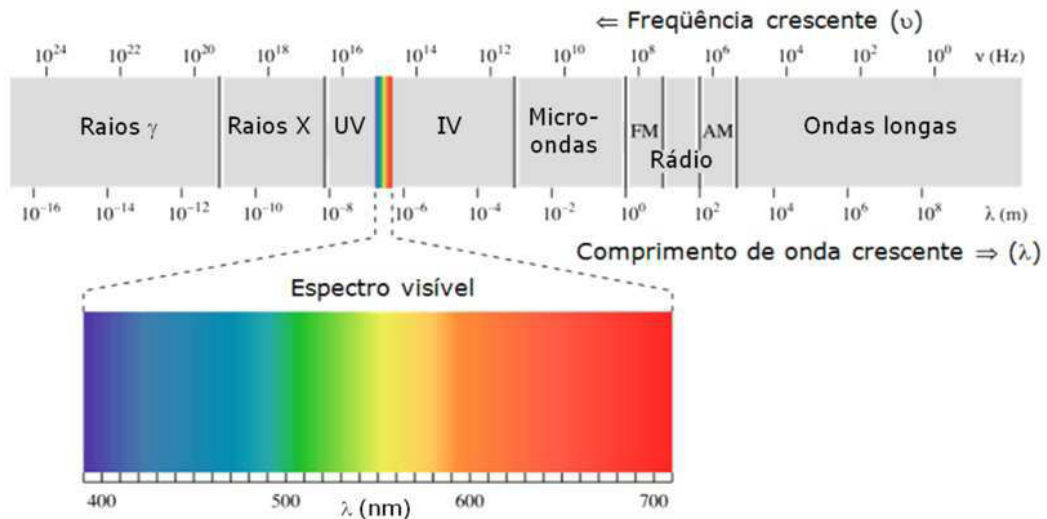


Figura 11 - Espectro de radiação eletromagnética, com destaque para o espectro de luz visível.

Fonte: Costa (2009).

Neste espectro contínuo, convencionou-se a sua divisão em seis cores principais, que se encontram na Tabela 5, com a indicação de seu respectivo comprimento de onda (λ).

Tabela 5 - Cor espectral para cada faixa do comprimento de onda na região de luz visível.

Cor espectral	λ (nm)
Violeta	400 – 430
Azul	430 – 500
Verde	500 – 570
Amarelo	570 – 590
Laranja	590 – 610
Vermelho	610 - 700

Fonte: Leite (2008).

É importante salientar que a cor de um objeto depende do espectro da fonte de luz. Assim, um mesmo objeto observado sob a luz do dia, sob uma lâmpada incandescente e sob uma lâmpada fluorescente poderá apresentar cores distintas. A luz do dia tem distribuição larga de comprimentos de onda, a lâmpada incandescente possui maior participação de comprimentos de onda elevados (daí sua cor amarelada) e a lâmpada fluorescente privilegia determinados comprimentos de onda que faz com que ela tenha uma cor levemente azulada (MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

2.3.2 O objeto

Três fenômenos podem ocorrer quando uma fonte de luz incide sobre um objeto: reflexão, absorção e/ou transmissão, ou seja, os objetos alteram e redistribuem as características espectrais da luz que interage com eles (LEITE, 2008). Sob o ponto de vista da percepção da cor, os fenômenos da reflexão e absorção da cor são os mais importantes.

Este fato ocorre devido à capacidade de absorver (ou refletir) determinados comprimentos de onda, que é uma característica específica de cada material. Assim, a cor de um objeto é uma consequência dos comprimentos de onda que ele é capaz de absorver e refletir. Um objeto é visto como vermelho porque reflete somente a fração do espectro relativa ao comprimento de onda da cor vermelha. Um objeto branco é capaz de refletir todos os comprimentos de onda da região visível do espectro e, de forma semelhante, um objeto preto absorve todos os comprimentos de onda da região visível do espectro, e não reflete nenhum comprimento de onda na região visível (MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

2.3.3 O observador

O homem não apresenta a mesma sensibilidade em todos os comprimentos de onda e nem todos os indivíduos tem a mesma percepção da cor (COSTA, 2009). No interior do olho humano existem os cones e os bastonetes, estruturas responsáveis pela recepção da energia luminosa. Quando detectada, a energia luminosa é convertida em impulsos nervosos pela retina, que são transmitidos ao cérebro (MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

São necessários três parâmetros para se caracterizar uma cor: tonalidade, luminosidade e saturação. Isto significa que cada cor pode estar representada por estes três valores que são o ponto de partida na definição de cores através dos sistemas internacionais criados pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (LEMAIRE; ESCADEILLAS; RINGOT, 2005).

A tonalidade corresponde ao comprimento de onda predominante (MELCHIADES; BOSCHI, 1999). A luminosidade está relacionada à intensidade da energia eletromagnética, representando a proporção de energia refletida relativamente à energia absorvida (COSTA, 2009). A saturação depende das proporções ocupadas por cada comprimento de onda na radiação eletromagnética (MELCHIADES; BOSCHI, 1999), quanto maior for a concentração da radiação refletida à volta do comprimento de onda predominante maior será a sua saturação, ou seja, será um espectro com uma curva estreita em redor de um determinado comprimento de onda (COSTA, 2009).

A definição e determinação destes atributos de cor estão diretamente relacionados à fatores como a distância entre o observador e o objeto, o tipo de fonte luminosa, o entorno ou a capacidade de percepção de cada pessoa (COELHO, 2000). Cabe ressaltar que para o branco e o preto, passando pelo cinza, não existe nem tonalidade nem saturação (por exemplo,

luz acromática), uma vez que a intensidade da radiação é uniforme na zona do visível, sendo apenas possível haver distinção pela luminosidade (COSTA, 2009).

2.4 SISTEMAS DE AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA

A fim de tornar a comparação de cores de determinados objetos mais acessível e precisa, a CIE (*Comission International de L'Eclairage*), estabeleceu o espaço cromático Yxy, em 1931 e o espaço colorimétrico L^*a^*b em 1976, atualmente os mais utilizados (LEITE, 2008).

Os sistemas de avaliação numérica da cor baseiam-se na refletância e normalmente representam-na a partir dos parâmetros de tonalidade, saturação e luminosidade (ABITANTE, 2004).

O método do espaço colorimétrico Yxy é baseado no sistema de percepção das cores pelo olho humano (tristímulus). A localização dos pontos relativos a cada cor é calculada matematicamente a partir da intensidade relativa dos comprimentos de onda correspondentes às cores vermelho (x), verde (y) e azul (z), no espectro da cor que se quer caracterizar. Ao longo da linha mais externa do diagrama cromático estão dispostas todas as tonalidades e o grau de saturação aumenta do centro para as bordas da figura. A proximidade de algumas cores é o principal inconveniente deste método, dificultando suas diferenças (MELCHIADES; BOSCHI, 1999).

2.4.1 CIELab

Para solucionar este problema o método CIELab utiliza um novo tratamento matemático das mesmas intensidades relativas das radiações correspondentes às cores vermelho, verde e azul, que busca a uniformização do espaçamento entre as cores no espaço colorimétrico (MELCHIADES; BOSCHI, 1999). Dado o seu caráter tridimensional, a cor pode ser representada graficamente por um sistema de coordenadas perpendiculares: $L^* a^* b^*$ (ABITANTE, 2004).

Conforme a Figura 12, a localização da cor é dada pelas coordenadas no espaço de cor onde:

- Parâmetro L^* : indica o grau de luminosidade, varia entre 0 (preto) e 100 (branco);

- Parâmetro a^* : indica a cromacidade na direção do verde para o vermelho, onde $a^* < 0$ significa maior participação da cor verde, $a^* > 0$, maior participação da cor vermelha;
- Parâmetro b^* : indica a cromacidade na direção do azul para o amarelo, onde $b^* < 0$ significa maior participação da cor azul, $b^* > 0$, maior participação da cor amarela (VÁZQUEZ-NION et al., 2013).

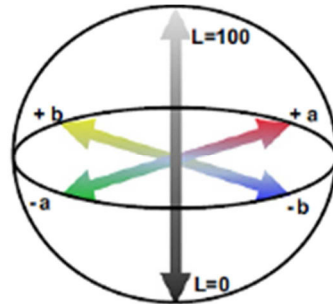


Figura 12 - Espaço de cor CIELab.

Fonte: Korifi et al. (2013).

A cor é representada por um ponto neste espaço, o que permite alta precisão em sua definição (KORIFI et al., 2013).

Utilizando-se as coordenadas L^* a^* b^* pode-se comparar a cor de objetos e quantificar suas diferenças, estabelecidas em função da variação destes parâmetros. A diferença total da cor (ΔE^*) é calculada através da Equação 1, descrita abaixo (LÓPEZ et al., 2009):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Equação 1

Onde:

ΔE = Diferença total da cor, em unidade Judd;

ΔL^* = variação da luminosidade;

Δa^* = variação de cromacidade na direção verde/vermelho;

Δb^* = variação de cromacidade na direção amarelo/azul.

Cabe ressaltar que o ΔE descreve a magnitude, mas não a tendência da cor em análise. Para isso é necessário avaliar os valores individualmente. Segundo Abitante (2004), normalmente a tolerância para a luminosidade (L^*) é menor do que para a cromacidade.

Admitindo-se que existe uma variação de cor entre os materiais, é importante determinar a partir de que valor de ΔE considera-se uma variação de cor perceptível. Referências com relação às diferenças na percepção colorimétrica são encontradas na indústria de tintas. Porém, López et al. (2009) apresentam uma classificação visual mais simplificada (Tabela 6).

Tabela 6 - Percepção das diferenças de cor ΔE .

Diferenças de cor (ΔE)		Classificação
0,5	1,5	Leve
1,5	3,0	Óbvia
3,0	6,0	Muito óbvia
	>6,0	Grande

Fonte: López et al. (2009).

2.4.2 Histogramas de cor

A visão computacional procura imitar a visão humana, portanto possui também uma imagem como entrada, porém, a saída é uma interpretação da imagem como um todo ou parcialmente. Os histogramas são ferramentas de processamento de imagens, determinados a partir de valores de intensidade dos pixels (MARENGONI; STRINGHINI, 2009). Para cada valor de cor presente na imagem, o histograma informa a probabilidade de um pixel da imagem possuir esta cor.

O histograma é um gráfico que tem como eixo horizontal a escala de tons de cinza (que pode variar de 0 a 255) e cujo eixo vertical representa a probabilidade de ocorrência de tons de cinza na imagem (GOMES, 2001). O histograma de uma imagem traduz a distribuição estatística de seus níveis de cinza, tratando-se de uma representação gráfica do número de pixels associado a cada nível de cinza presente na imagem (QUEIROZ E GOMES, 2006).

Filho e Neto (1999) definem o histograma de uma imagem como sendo um conjunto de números que indicam o percentual de pixels naquela imagem que apresentam um determinado nível de cinza. Normalmente são representados por gráficos de barras que fornece para cada nível de cinza o número (ou o percentual) de pixels correspondentes na imagem. Através da sua visualização é possível obter uma indicação da qualidade da imagem

O histograma de uma imagem I é definido pela Equação 2:

$$h(I_k) = n_k$$

Equação 2

Onde:

I é um valor de intensidade k ;

n é o número de pixels na imagem I que possuem a intensidade k .

A Figura 13 mostra como um histograma é determinado.

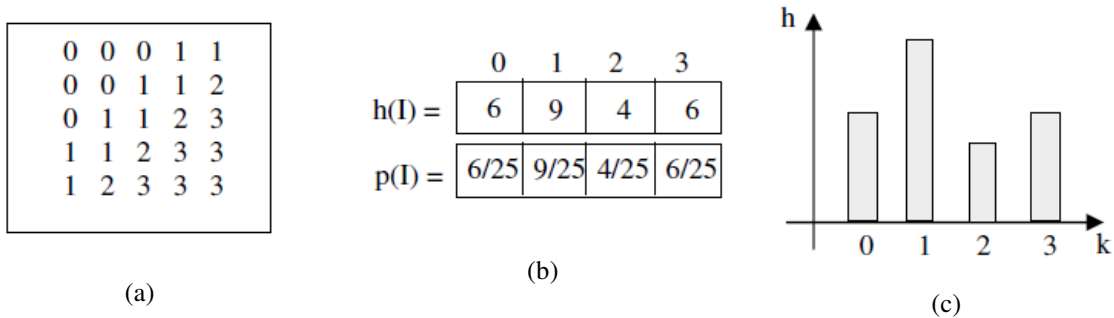


Figura 13 – (a) uma imagem I; (b) o histograma da imagem em valores e (c) a representação gráfica do histograma.

Fonte: Marengoni; Stringhini (2009).

2.5 ESTUDO DA RETRAÇÃO EM CONCRETO

Em seu estado endurecido, o concreto é um material poroso cuja água que ainda não reagiu quimicamente, presente na estrutura da pasta, tende a evaporar devido às condições de temperatura e umidade do ambiente. Esta perda de água pode causar retração, na qual a ocorrência e magnitude dependem do diâmetro dos poros de onde a água será removida. A retração é considerada uma das principais causas de deformação do concreto. Um elemento de concreto com restrições de deformações por retração pode desenvolver tensões que levam à fissuração da peça, através das quais agentes agressivos podem penetrar, causando danos às armaduras e à durabilidade e resistência do material.

Hasparyk et al. (2005) define a retração como um fenômeno associado à deformações em pastas de cimento, argamassas e concreto, sem que haja qualquer tipo de carregamento, sendo, de maneira geral, a perda de água da pasta de cimento é a sua principal causa. Os autores classificam os tipos de retração pelo estado em que se encontra o concreto, conforme segue.

No estado fresco:

- Retração por **assentamento plástico**, que é comandado por dois fenômenos, o da movimentação das partículas sólidas para baixo devido à ação da gravidade e, no sentido contrário, o da exsudação, que representa a movimentação do ar aprisionado e da água. Durante a movimentação das partículas sólidas obstáculos, como a armadura ou agregados de dimensões maiores, que impeçam a movimentação homogênea deste assentamento podem causar fissuras, aparecendo normalmente nos primeiros momentos após o lançamento;

- **Retração plástica**, que ocorre antes do fim da pega, por meio da evaporação da água do concreto ainda não endurecido devido à exposição de sua superfície às intempéries como vento, baixa umidade relativa e aumento da temperatura.

No estado endurecido:

- A **retração autógena** é o fenômeno em que materiais cimentícios encolhem a uma temperatura constante sem qualquer alteração no peso, ou seja, a macroscópica variação do volume ocorre com pouca umidade transferida para o ambiente exterior. É afetada por vários fatores tais como relação a/agl, tipo de mistura mineral adicionada à dosagem (LI; BAO; GUO, 2010);
- A **retração por secagem** é definida por Neville (1997) como sendo a retração causada pela secagem do concreto e, na prática, nela está incluída a contração devido à variação autógena de volume. A retração por secagem está associada à perda de umidade para o meio ambiente, tornando-a uma das principais causas de fissuração e assumindo papel importante, pois sua ocorrência pode afetar a durabilidade do concreto. Quando exposto à umidade do ambiente que estiver abaixo da saturação, uma pasta de cimento saturada não se manterá dimensionalmente estável, principalmente devido à perda de água fisicamente adsorvida do C-S-H, que resulta em deformação por retração;
- **Retração de origem térmica** deve-se ao calor gerado durante a hidratação do cimento Portland dá origem às tensões térmicas que tracionam o concreto na sua fase de resfriamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O mecanismo de hidratação do cimento resulta em reação exotérmica, liberando uma energia em torno de 500J/g de cimento. Adições pozolânicas como a CV resultam em menor calor de hidratação já que as mesmas não são exotérmicas e são produtos de hidratação mais lenta. Ao contrário dos cimentos que possuem maiores teores de alita (C_3S) e de aluminato tricálcio (C_3A) e, portanto, resultam em maior calor de hidratação. Outro aspecto que contribui para o aumento do calor de hidratação é a finura do cimento, uma vez que, quanto mais fino, mais rápidas serão as reações de hidratação, não só pela maior superfície específica que propicia condições favoráveis para ser atacada, como também a natural maior

reatividade das menores partículas (GRAÇA; BITTENCOURT; SANTOS, 2005). Este é o caso do cimento Portland branco que, como já visto anteriormente, possui alto teor de C_3A e partículas mais finas que os convencionais cimentos cinza.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a retração térmica ocorre devido ao seu resfriamento nas primeiras idades, e se inicia após a expansão do concreto, a qual é resultante da elevação da temperatura gerada pelo calor de hidratação. Porém, este problema não se limita as estruturas massivas de concreto, podendo atuar também em estruturas mais esbeltas com consumo de cimento elevado.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que as deformações no concreto ocorrem como resultado da reação do material à carga externa e ao ambiente, e frequentemente levam à fissuração. O concreto recém endurecido, ao ser exposto ao ambiente e à umidade, normalmente sofre contração térmica (deformação de retração associada ao resfriamento) e retração por secagem (deformação por retração ligada à perda de umidade).

Muitas são as propriedades relacionadas com a retração térmica. Graça et al. (2005) relacionam algumas apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais propriedades do concreto relacionadas com a retração térmica.

Propriedades	Descrição
Térmicas	Calor específico, condutividade térmica, coeficiente de deformação
Mecânicas	Resistência à compressão e tração
Elásticas	Módulo de elasticidade
Viscoelásticas	Fluência, retração, relaxação
Físicas	Massa específica

Fonte: Adaptado Graça, Bittencourt, Santos (2005).

Os autores ainda acrescentam que durante o processo de hidratação do cimento, o calor gerado que não escapa para o meio ambiente é absorvido pelo concreto, causando um aumento de temperatura e, conseqüentemente, uma expansão do concreto. Ou seja, a superfície do concreto em contato com o meio externo perde mais rapidamente calor do que o núcleo, que terá uma elevação de temperatura maior. Como a temperatura aumenta, a expansão do calor do núcleo expandirá a zona da superfície, causando fissurações. No entanto, durante este período subsequente, o concreto ganha rapidamente resistência e rigidez. A zona central contrairá mais do que a zona da superfície. Quando a tensão de tração ou a capacidade de deformação de tração do concreto é ultrapassada, ocorre a fissuração.

A principal manifestação patológica relacionada à retração térmica é a fissuração, que pode levar a uma deterioração da estrutura tendo em vista a abertura de um caminho livre

para a percolação da água, possivelmente iniciando um processo de lixiviação (GRAÇA; BITTENCOURT; SANTOS, 2005).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o uso de adições minerais no concreto como a CV, proporciona melhorias quanto à resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, além do aumento na resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição.

Dellinghausen et al. (2009) investigaram as influências do teor de escória e do período de cura na retração total de concretos com cimento Portland de alta resistência inicial e cimento Portland branco estrutural. Adotaram-se relações água/aglomerante de 0.30, 0.42 e 0.55, teores de escória, em substituição ao cimento Portland, de 0%, 50% e 70%, e períodos de cura de 3 e 7 dias. Dos resultados obtidos, constatou-se que o aumento do teor de escória resultou em decréscimo nos valores de resistência à compressão e de retração para os dois cimentos investigados. A diminuição no período de cura resultou em maiores valores de retração tanto no concreto branco quanto no cinza, independentemente do teor de escória utilizado. Foram obtidos maiores valores de retração total nos concretos moldados com cimento Portland branco, quando comparados ao cinza, inclusive nas misturas compostas com escória, em igualdade de cura e relação água/aglomerante.

2.6 CINZA VOLANTE

A produção de cimentos ou materiais cimentícios com a incorporação de pozolanas como adições minerais permite que os mesmos sejam produzidos sem que haja a utilização de boa parte da matéria prima, principalmente o calcário, o que possibilita a economia deste insumo e também a redução na liberação de CO₂ para a atmosfera e no consumo de energia (BARATA; ANGÉLICA, 2012).

A cinza volante pode ser definida como um material pozolânico, finamente dividido proveniente da combustão em centrais termoelétricas de carvão mineral pulverizado ou granulado. Como toda pozolana, é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, apesar de não ter por si só propriedade de um ligante hidráulico, na forma finamente dividida e em presença de água, reage com o hidróxido de cálcio formando: silicato de cálcio hidratado – C-S-H (SUPIT; SHAIKH; SARKER, 2014).

Durante a combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas, quando o carvão passa através da zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais (argilas, quartzo e feldspato)

funde-se. A matéria fundida é rapidamente transportada para as zonas de baixa temperatura, solidificando-se em forma de partículas esféricas de vidro. Uma parte desses minerais se aglomera, formando a cinza de grelha, mas a maioria das partículas finas é carregada pela corrente de exaustão do gás, passando a ser denominada cinza volante (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Recena (2011), o desenvolvimento de cimentos pozolânicos no Rio Grande do Sul teve início na década de 1960, a partir de estudos realizados pelo Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul, buscando o aproveitamento da CV produzida pela usina termelétrica de Charqueadas. A partir disto, as duas fábricas de cimento existentes na época, a Companhia de Cimento Portland Gaúcho (hoje pertencente ao Grupo Votoratim) e a fábrica de cimento Sol Nascente (hoje CIMPOR), passaram a produzir cimento pozolânicos, a partir da mistura desta cinza com o clínquer.

A utilização de CV modifica as propriedades do concreto nos estado fresco e endurecido, com melhorias para a trabalhabilidade, resistência, retração por secagem, aumento da temperatura e resistência à abrasão (ATIŞ; KILIÇ; SEVİM, 2004).

De acordo com a *American Society for Testing Materials* (ASTM C618; 2012), as cinzas que contenham mais de 70 % de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e sejam pobres em cal são definidas como classe F, enquanto aquelas com um teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ compreendido entre 50 e 70 % e elevado teor de cal são definidas como classe C. O alto teor de cálcio das cinzas Classe C proporciona propriedades cimentícias (auto endurecimento ao reagir com H_2O). Outra diferença entre as classes é que a quantidade de álcalis (combinando de sódio e potássio), e sulfatos (SO_4) são geralmente mais elevadas em cinzas volantes de classe C (AHMARUZZAMAN, 2010).

De acordo com a literatura, as partículas da cinza costumam ser esféricas (SCHNEIDER et al., 2011; AHMARUZZAMAN, 2010; KUTCHKO e KIM, 2006) e seu tamanho depende do grau de pulverização do carvão, do processo térmico envolvido e do tipo de filtro utilizado na estação (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003)

A massa específica das cinzas volantes geralmente varia de 2,1 a 3,0, enquanto que a sua área de superfície específica pode variar de 170-1000 m^2/kg . A cor pode variar de castanho, cinza ao preto, dependendo da quantidade de carbono não queimado (AHMARUZZAMAN, 2010). Segundo Silva (2010), o diâmetro pode variar de 1 a 150 μm , sendo a maior parte menor que 45 μm , e a superfície específica Blaine encontra-se entre 200 e

800 m²/kg. Partículas de CV menores que 10µm aumentam a resistência até os 28 dias de idade; partículas entre 10 e 45 µm aumentam a resistência nas idades superiores à 28 dias, enquanto partículas maiores não contribuem para o ganho de resistência (SILVA, 2010).

As cinzas volantes também contém diferentes elementos secundários, incluindo P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, Mn, B, Mo. Possuem concentrações elevadas de sílica (60-65%), alumina (25-30%), a magnetita, Fe₂O₃ (6-15 %), o que permite a sua utilização para a síntese do zeólito, alumínio e sílica precipitada. As outras características físico-químicas importantes de cinzas volantes, tais como massa, densidade, tamanho de partícula, porosidade, capacidade de retenção de água, e área superficial fazem com que seja adequada também para o uso como adsorvente (AHMARUZZAMAN, 2010).

As propriedades químicas das CV são influenciadas em grande parte pelas propriedades do carvão a ser queimado e as técnicas utilizadas para manuseio e armazenamento. Os principais componentes de cinzas volantes de carvão betuminoso são sílica, alumina, óxido de ferro e cálcio, com quantidades variáveis de carbono medidas pela perda ao fogo (AHMARUZZAMAN, 2010).

A composição mineralógica das cinzas volantes, que pode ser estabelecida por difração de raios-X, depende dos fatores geológicos relacionados com a formação e deposição do carvão e as condições de combustão. As fases minerais dominantes são o quartzo, caulinita, ilite, e sideraete. Os minerais em menor quantidade incluem calcita, pirita e hematita. Quartzo e mulita são os principais constituintes cristalinos de cinzas pobres em cálcio. Visto que esses minerais são não-reativos à temperatura normal, sua presença em grandes proporções tende a reduzir sua atividade pozolânica. Entretanto, cinzas com altos teores de cálcio consistem em quartzo, C₃A, CS e C₄AS (AHMARUZZAMAN, 2010; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Análises de difração de raios-X indicam que os principais minerais cristalinos nas CV de baixo teor de cálcio são quartzo, mulita e hematita ou magnetita. Visto que esses minerais são não-reativos à temperatura normal, sua presença em grandes proporções tende a reduzir sua atividade pozolânica.

Kutchko e Kim (2006) analisaram amostras de CV utilizando a microscopia eletrônica de varredura juntamente com EDS, fornecendo informações detalhadas sobre a imagem, a morfologia e textura superficial das partículas individuais, bem como a composição elementar das amostras. O tamanho das partículas analisadas no estudo variaram

de 1 a mais de 200 μm constituindo esferas sólidas (Figura 14a), cenosferas ocas (Figura 14b) e partículas de carbono não queimadas de formato irregular (Figura 14c). Conforme determinado por EDS, os elementos predominantes nas amostras de cinzas foram de silício, alumínio, ferro, cálcio e oxigênio. O alumínio foi principalmente associado ao silício. Menores quantidades dos elementos potássio, magnésio, sódio, titânio e enxofre foram observados. Silva (2010) atribui essa variação ao tipo e processo de queima. Mehta e Monteiro (2008) acrescentam que as partículas esféricas de CV classe F se mostram mais limpas do que nas CV de alto teor de cálcio.

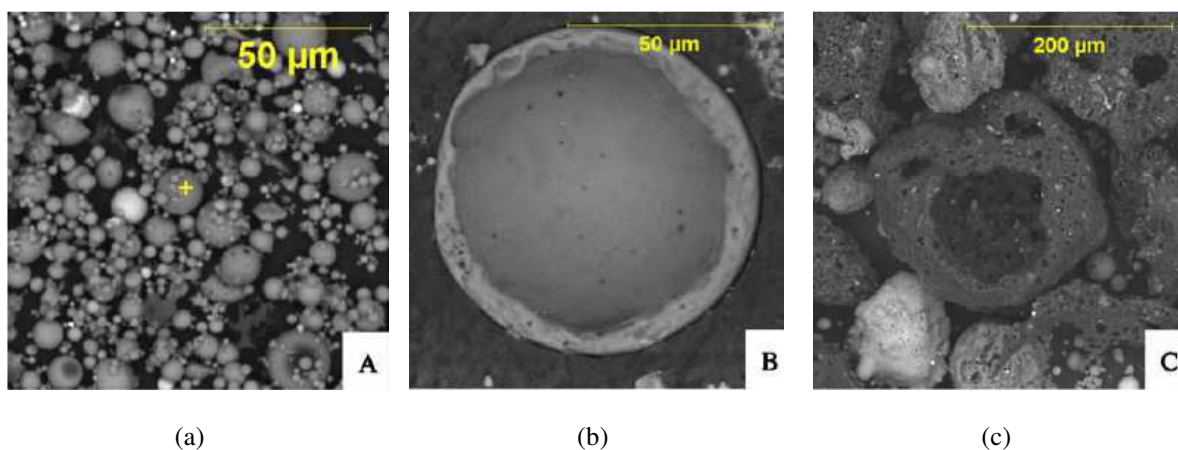


Figura 14 - Morfologia das partículas de CV (a) esferas sólidas, (b) cenosferas ocas, (c) partículas de carbono não queimadas.

Fonte: Kutchko e Kim (2006).

A maior parte das CV de alto-fornos modernos, independente do teor de cálcio, contém aproximadamente 60 a 85% de vidro, 10 a 30% de compostos cristalinos e até cerca de 5% de carbono não queimado. Mais do que 5% de carbono em uma CV para uso como adição mineral é considerado indesejável pois as partículas celulares de carbono tendem a aumentar a necessidade de água para determinada consistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A utilização de CV influencia beneficemente muitas propriedades do concreto, algumas pelo efeito físico associado ao tamanho das partículas, outras pelo efeito químico pozolânico e outras pela ação conjunta dos dois efeitos. Dal Molin (2005) salienta que a eficiência da adição pode variar em função da sua composição química, mineralógica e granulométrica. Mehta e Monteiro (2008) acrescentam que por terem a granulometria mais fina que a do cimento, a CV preenche os espaços vazios na interface aglomerante-agregado, alterando a microestrutura do concreto ou da argamassa e repercutindo normalmente no

aumento da impermeabilidade, da resistência final e a durabilidade do concreto a determinados ataques químicos.

No estado endurecido, a adição de CV causa um refinamento na microestrutura do material através da redução na porosidade da matriz e da zona de transição levando a uma melhora na resistência à compressão. Além de modificar as propriedades físicas e mecânicas do concreto, adições como a CV preenchem a porosidade do esqueleto granular do concreto, resultando numa microestrutura mais densa e conseqüentemente, de menor porosidade, o que aumenta a durabilidade dos materiais frente aos agentes agressivos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Em relação à resistência à tração, uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local. Assim, Dal Molin (2005) conclui que o aumento da resistência à compressão decorrente do efeito de microfíler não corresponderá a um aumento proporcional na resistência à tração. O aumento da resistência à tração acontecerá quando ocorrerem as reações pozolânicas da adição mineral, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

Além disso, o uso de CV oferece a possibilidade de reduzir o aumento da temperatura devido ao calor de hidratação quase em proporção direta à quantidade de cimento Portland substituído pela adição, pois em condições normais, a adição não reage em grau significativo durante muitos dias (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O calor de hidratação gerado é reduzido com a substituição do cimento pela adição de CV já que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação. Dal Molin (2005) explica que como a reação pozolânica em geral é lenta e acontece somente após a formação do hidróxido de cálcio a partir da hidratação do cimento, o calor só será liberado após o pico de calor de hidratação do cimento, não se somando a este, pois ocorrerá em um período de tempo defasado. Assim, o aumento da temperatura em grandes massas de concreto pode ser reduzido uma vez que grande parte do calor é dissipado à medida que vai sendo gerado.

Poon et al. (2000) realizaram pesquisa sobre o calor de hidratação em concretos de alta resistência produzidos com CV com baixo teor de cálcio. Ensaio realizados em pastas com relação água/material cimentante iguais a 0,24, monitorados por 72 horas, os autores constataram que para a substituição de 25% de cimento por CV, a redução no valor acumulado do calor de hidratação foi de 16%. Para a substituição de 45% de cimento por CV,

a redução no valor acumulado do calor de hidratação foi de 36%. Os resultados mostraram o efeito duplo do uso de CV: físico, atuando como micro agregado e químico, com ação pozolânica.

Entretanto, com o uso de CV podem ocorrer fissuras por dessecação superficial ou retração plástica quando não for realizada uma cura adequada do concreto, e a velocidade de evaporação de água da superfície do mesmo for maior que a taxa de reposição da água pelo fenômeno de exsudação. Como as adições minerais geralmente resultam uma redução significativa na exsudação do concreto, dificultando a subida de água até a superfície, existe maior risco de fissuração, principalmente quando a taxa de evaporação é elevada (temperatura alta e baixa umidade relativa do ar, entre outros) (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Li, Bao e Guo (2010), a adição de cinza volante pode efetivamente reduzir a retração autógena. Termkhajornkit et al. (2005) estudaram a influência do uso de três tipos de cinza volante em concreto com relação água/aglomerante igual a 0,30. Conforme apresentado no gráfico da Figura 15, ao contrário dos resultados obtidos por Li, Bao e Guo (2010), houve um incremento na retração autógena quando a substituição de CV foi de 25%. Entretanto, quando a substituição por CV foi de 50%, a retração autógena se tornou extremamente pequena.

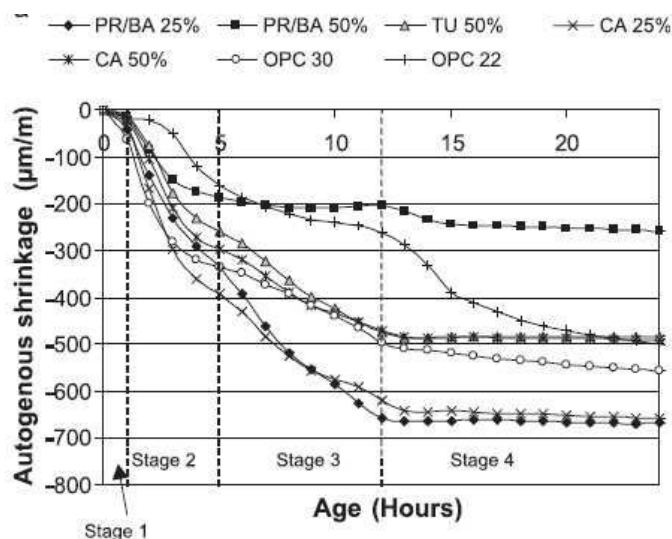


Figura 15 - Retração autógena.

Fonte: Termkhajornkit et al. (2005).

Kate e Murnal (2013) investigaram o efeito da substituição de cimento por cinza volante em concretos de alta resistência, com relação água/aglomerante igual a 0,30. Os autores avaliaram teores de substituição entre 0% e 70% em massa, e observaram um acréscimo na retração com o aumento do teor de CV para as três idades testadas: 7, 28 e 56

dias. Cabe ressaltar, entretanto, que devido à diferença de massa específica entre o cimento e a CV, o volume de pasta pode aumentar consideravelmente para elevados teores de substituição, o que pode explicar o aumento de retração observado neste estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa foi baseado em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis de controle para posteriormente, utilizar ferramentas na avaliação da influência de cada variável, o que permite maior confiabilidade nos dados. O planejamento teve início com a definição das variáveis de resposta e dos fatores de controle, necessários para alcançar os objetivos estabelecidos.

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

3.1.1 Variáveis de resposta

Através da revisão apresentadas, foi possível definir as variáveis de resposta de interesse ao projeto para que sejam alcançados os objetivos determinados:

- Resistência à compressão (MPa);
- Taxa de absorção capilar ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$);
- Variação dimensional (mm/m);
- Resistência à tração na flexão (MPa);
- Luminosidade ΔL ;
- Variação colorimétrica ΔE .

3.1.2 Fatores de controle

Vários são os fatores que interferem no desempenho do concreto cromático. Em função disso, é necessário restringir a matriz experimental a ser desenvolvida em alguns aspectos, limitando assim o número de variáveis. A Tabela 8 apresenta os fatores controláveis escolhidos a fim de avaliar possíveis mudanças de um nível para o outro sobre as variáveis de resposta em estudo.

Tabela 8 - Fatores de controle.

Fatores controláveis	Níveis adotados
Idades	Conforme ensaio
Material pigmentante	Lodo de fosfatização e pigmento comercial
Teores de substituição do LF	0%, 5%, 10% e 20%
Teores de substituição do PG	0%, 1% e 5%
Teores de substituição de CV	0%; 10% e 20%

3.1.3 Fatores fixos

Os fatores fixos com apenas um nível de estudo foram:

- Tipo de cimento: Portland branco estrutural;
- Agregado miúdo: Areia quartzosa;
- Relação a/agl: 0,40;
- Traço: 1:2,3;
- Índice de consistência: 280 mm (± 10);

3.1.4 Fatores não controlados

Algumas variáveis do estudo não foram controladas, como:

- Temperatura de moldagem;
- Umidade de moldagem.

Os valores de temperatura e umidade na data das moldagens estão apresentados na Tabela A1 (Apêndice).

3.1.5 Organização do programa experimental

A definição de programa experimental compreende a análise de todos os fatores envolvidos na pesquisa, tendo em vista as restrições experimentais como recursos econômicos e estrutura laboratorial, entre outros. A partir do conhecimento destes aspectos foi definido o programa experimental, que pode ser analisado no fluxograma esquemático, mostrado na Figura 16.

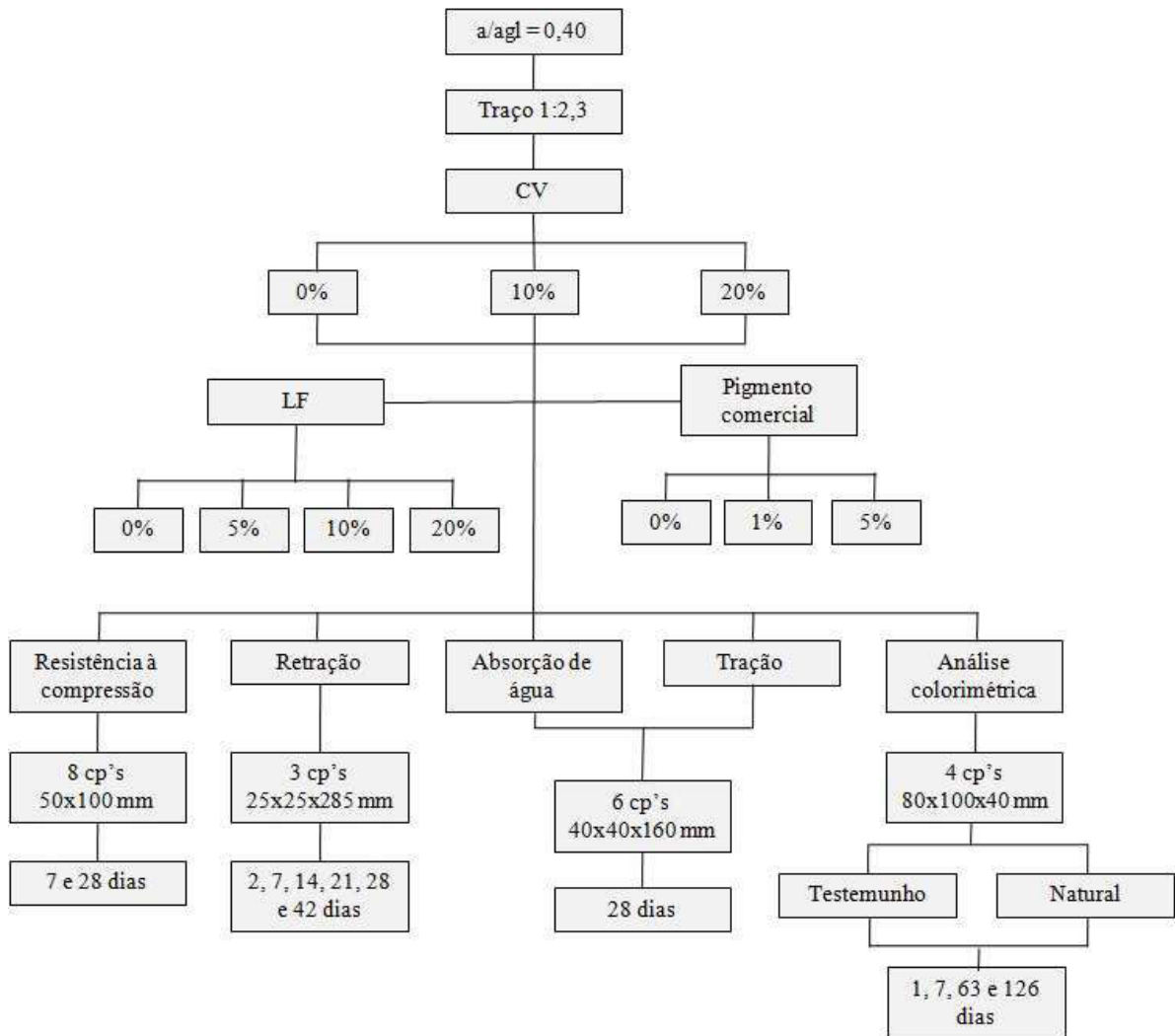


Figura 16 - Fluxograma representativo do programa experimental.

Na Tabela 9, pode-se visualizar a matriz experimental e todas as suas possíveis combinações.

Tabela 9 - Matriz experimental.

CV	Ref	LF				PG	
	0%	5%	10%	20%	1%	5%	
0%	REF	CV0_LF5	CV0_LF10	CV0_LF20	CV0_PG1	CV0_PG5	
10%	CV10	CV10_LF5	CV10_LF10	CV10_LF20	CV10_PG1	CV10_PG5	
20%	CV20	CV20_LF5	CV20_LF10	CV20_LF20	CV20_PG1	CV20_PG5	

Desta forma, o projeto compreende 18 traços com uma repetição por traço. Para cada combinação foram moldados:

- 8 CP's cilíndricos (50x100 mm), destinados ao ensaio de resistência à compressão;

- 3 CP's prismáticos (25x25x280 mm), destinados ao ensaio de variação dimensional;
- 6 CP's prismáticos (40x40x160 mm) destinados ao ensaio de resistência à tração na flexão e absorção capilar;
- 4 CP's prismáticos (80x100x40 mm), destinados aos ensaios colorimétricos.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o Portland branco estrutural, classe de resistência de 40 MPa. É um cimento de alta resistência inicial, finamente moído. A Tabela 10 apresenta as características físicas e mecânicas, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 10 - Caracterização do cimento Portland branco estrutural.

Caracterização Física	
Massa Específica (g/cm ³)	3,07
Área Específica (cm ² /g)	4,52
Início de Pega (h)	03:30
Fim de Pega	04:25

Fonte: Fabricante.

A resistência do cimento utilizado nesta pesquisa foi determinada através do ensaio especificado na ABNT NBR 7215 (1997). Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos para cada idade de ruptura, com dimensões de 50x100 mm. A média dos resultados pode ser encontrada no gráfico da Figura 17.

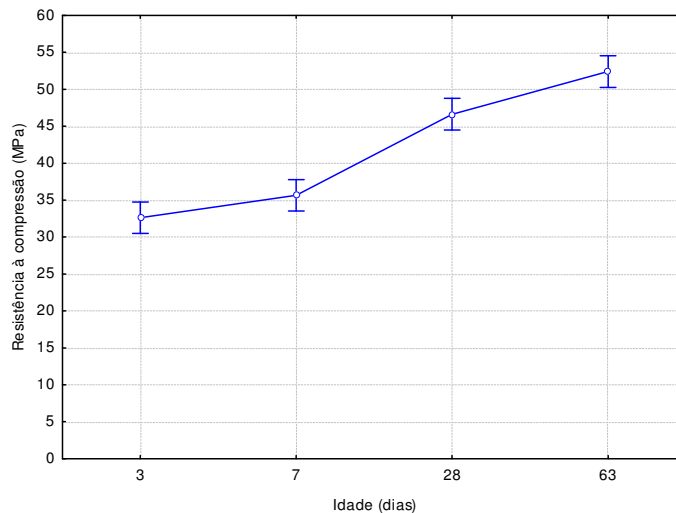


Figura 17 - Resistência à compressão do cimento Portland branco.

A fluorescência de raios X, realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, apresentou o Cálcio como elemento majoritário (Tabela 11), uma vez que neste tipo de cimento são empregados altos teores de calcário em substituição de parte do clínquer a fim de aumentar a brancura do material.

Tabela 11 - Fluorescência de Raios-X do cimento Portland branco.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Cálcio (Ca)	Silício (Si)	Enxofre (S)
		Ferro (Fe)
		Alumínio (Al)
		Titânio (Ti)
		Estrôncio (Sr)
		Manganês (Mn)

A granulometria a laser apontou que 95% da amostra se encontra na faixa de tamanho de partícula inferior a 49,47 μm , sendo o tamanho médio de partícula de 15,70 μm . O resultado do ensaio está representado na Figura 18.

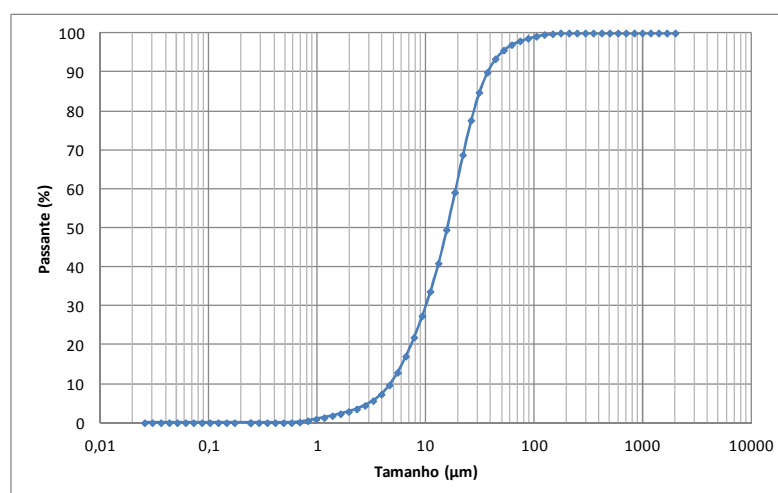


Figura 18 - Distribuição granulométrica do cimento Portland branco.

3.2.2 Agregado

Como agregado miúdo utilizou-se areia quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. A caracterização da areia foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica, massa unitária e perda ao fogo, que seguiram as recomendações das normas ABNT NM 248:2003, ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NM 45:2006, respectivamente. A areia foi seca em estufa e resfriada ao ar em local abrigado para a realização da caracterização, bem como para a utilização para esta pesquisa. Após este processo a areia foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. Os dados

referentes à caracterização da areia são apresentados na Tabela 12 e a curva granulométrica na Figura 19.

Tabela 12 - Caracterização física do agregado miúdo.

Determinações	Resultados obtidos		
Módulo de finura	2,26		
Massa específica	2,60 g/cm ³		
Massa unitária	1,54 g/cm ³		
Perda ao fogo	0,56%		
Composição granulométrica	Abertura da peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
	4,8	0,0	0,0
	2,4	3,5	3,5
	1,2	10,0	13,5
	0,6	22,5	36,0
	0,3	47,0	83,0
	0,15	7,5	90,5
	< 0,15	9,5	100,0

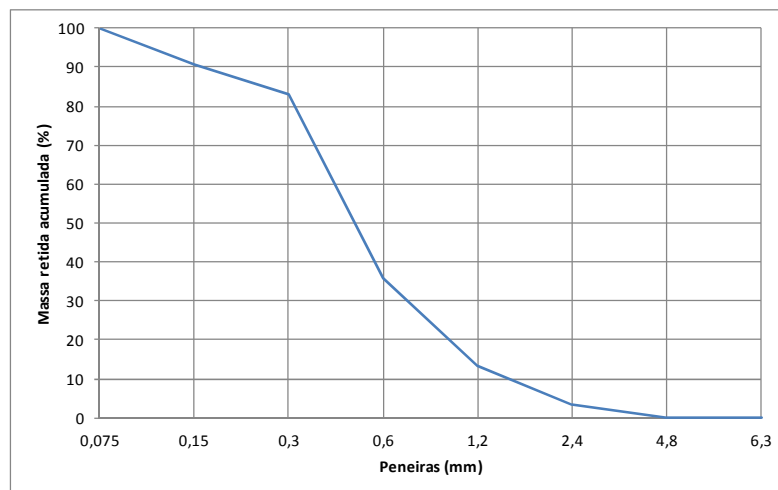


Figura 19 - Curva de distribuição granulométrica da areia.

3.2.3 Cinza volante (CV)

De acordo com Ahmaruzzaman (2010), a caracterização de cinzas volantes em termos de composição, mineralógica, química da superfície e da reatividade é de fundamental importância no desenvolvimento de várias aplicações.

A determinação da composição química da adição mineral foi feita através do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos. Esta técnica é não-destrutiva para todos os tipos de amostras. O equipamento utilizado é um Espectrômetro de Fluorescência de raios X por Energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu do Brasil Comércio Ltda. O resultado desta caracterização é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Fluorescência de raios-X da Cinza volante.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Silício (Si)	Ferro (Fe)	Enxofre (S)
	Alumínio (Al)	Tálio (Ti)
	Potássio (K)	Bário (Ba)
	Cálcio (Ca)	Zircônio(Zr)
		Manganês (Mn)
		Estrôncio (Sr)
		Rubídio (Rb)
		Zinco (Zn)

Em continuidade à caracterização da amostra de CV empregada no estudo, esta foi submetida ao ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica empregando-se condutividade elétrica (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989). O valor obtido para o índice, assim como os resultados da quantidade de matéria orgânica presente e da umidade em sua composição são apresentados na Tabela 14. A

Tabela 15 mostra a classificação de materiais pozolânicos quanto à diferença de condutividade.

Tabela 14 - Caracterização da cinza volante.

Ensaio	Resultado
Massa específica	1,82 g/cm ³
Umidade	1,05%
Perda ao fogo	0,27%
Índice de atividade pozolânica	0,87 mS/cm

Tabela 15 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade.

Pozolanidade do material	Condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanidade	> 1,2

Fonte: Luxan (1989).

A superfície específica de uma CV é de difícil determinação, pois as partículas esféricas tendem a se acomodar de forma mais compacta do que as partículas de cimento, impondo maior resistência à passagem do ar. A massa específica pode ser influenciada pela existência de partículas ocas ou de partículas mais pesadas. Dessa forma, o ensaio de massa específica foi repetido cinco vezes, utilizando-se a média dos resultados obtidos.

A caracterização mineralógica da CV foi realizada no difratômetro Siemens 5000 do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Física da UFRGS. O difratograma obtido apresenta um halo amorfo, característico dos materiais pozolânicos, e compostos cristalinos identificados como quartzo e mulita. O difratograma e a identificação dos picos cristalinos podem ser visualizados na Figura 20.

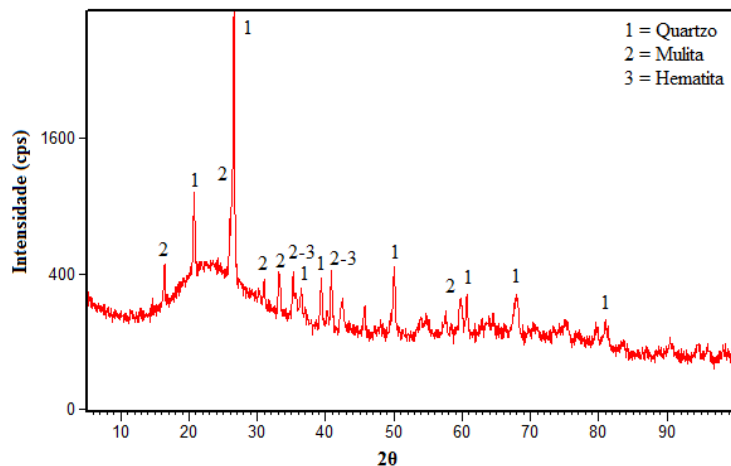


Figura 20 - Difratoograma de Raios X da cinza volante.

De acordo com a intensidade das raias de difração, verifica-se que, dos compostos cristalizados, o mais frequente é o quartzo, ocorrendo secundariamente, mulita e hematita. Além disso, observa-se que o pico do halo amorfo encontra-se aproximadamente na região de $23^\circ - 2\theta$, e a maior intensidade cristalina foi identificada na região de $27^\circ - 2\theta$. Estes resultados são similares aos encontrados por Ryu et al. (2013), Vargas et al. (2011) e Hoppe Filho (2008).

A distribuição granulométrica da CV foi realizada de acordo com a ISO 13320 (2009), em um granulômetro de difração a laser, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM), na Unisinos. A análise granulométrica, apresentada na Figura 21, constatou que o tamanho médio das partículas é de $52,32 \mu\text{m}$ e que 95% das partículas apresentam dimensão inferior a $132,8 \mu\text{m}$. É importante ressaltar que a amostra de CV não sofreu qualquer tipo de tratamento após a coleta.

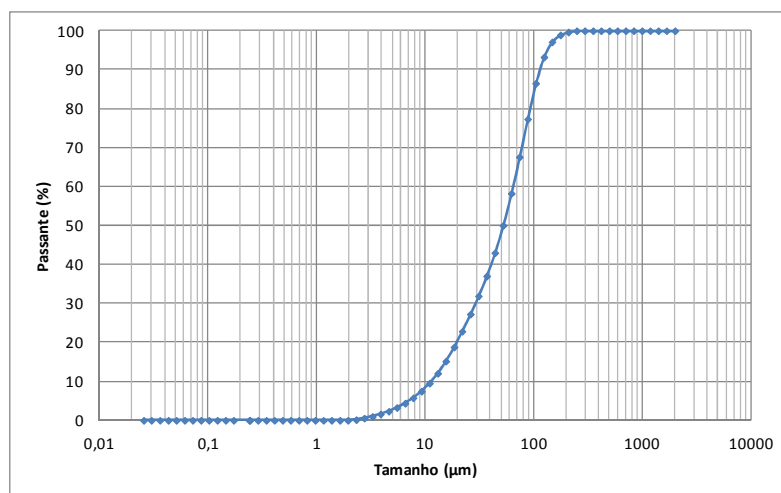


Figura 21 - Distribuição granulométrica da cinza volante.

Para auxiliar no entendimento do comportamento dos materiais utilizados fez-se uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no Laboratório ITT Fuse da Unisinos, em equipamento EVO MA15 Zeiss, com detectores de elétrons secundários. Antes da análise, a amostra foi seca em estufa e metalizada com ouro e paládio. A caracterização enfocou a morfologia das partículas dos materiais utilizados, o que pode auxiliar na compreensão do comportamento das variáveis de resposta das matrizes cimentícias estudadas.

A forma e a textura das partículas de cinza volante obtidas pela análise de elétrons secundários, podem ser vistas na Figura 22. Observa-se que a maioria das partículas é de esferas com superfície lisa e plerosferas (esferas ocas repletas de numerosas esferas reduzidas). Entretanto, há também algumas partículas irregulares e de superfície rugosa, o que aumenta a área exposta do grão. De acordo com Silva (2010), a ampla faixa de variação no diâmetro das partículas é determinada principalmente pelo tipo de equipamento utilizado para a queima.

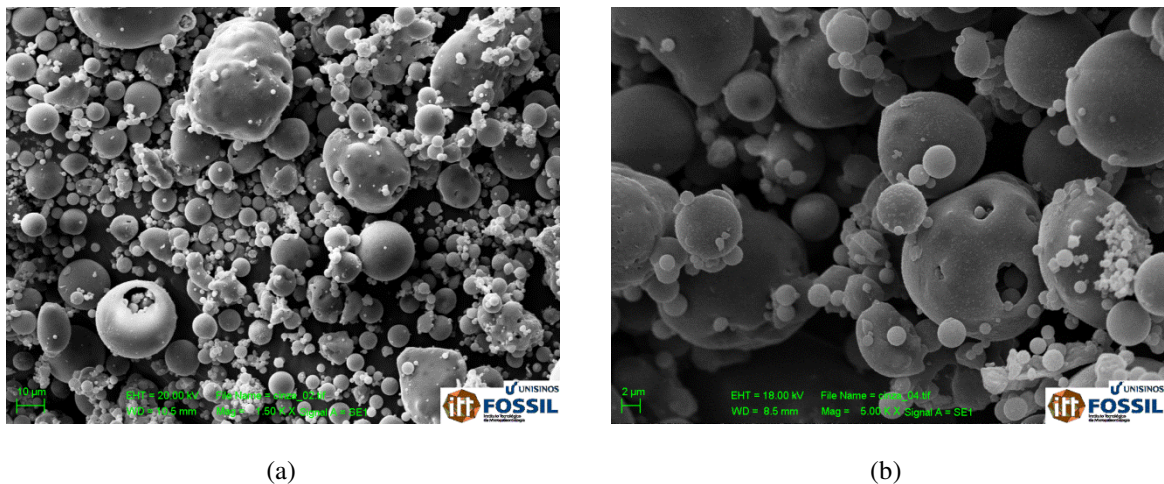


Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza volante (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 5.000x.

Além da forma e dimensão das partículas, também é importante analisar a distribuição dos principais elementos químicos presentes na amostra. Através da análise semiquantitativa por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) acoplada no equipamento, emitem-se feixes de raios-x característicos de cada elemento sobre a partícula analisada e obtém-se a imagem da distribuição referente ao elemento. Realizado a partir da Figura 22(a), observa-se que existe uma distribuição espacial uniforme dos elementos analisados e, quantitativamente (Tabela 16) em teores decrescentes de silício, alumínio e ferro. Os elementos e quantitativos encontrados na cinza volante estão de acordo com diversos estudos realizados (RYU et al., 2013; SILVA, 2010; HOPPE FILHO, 2008).

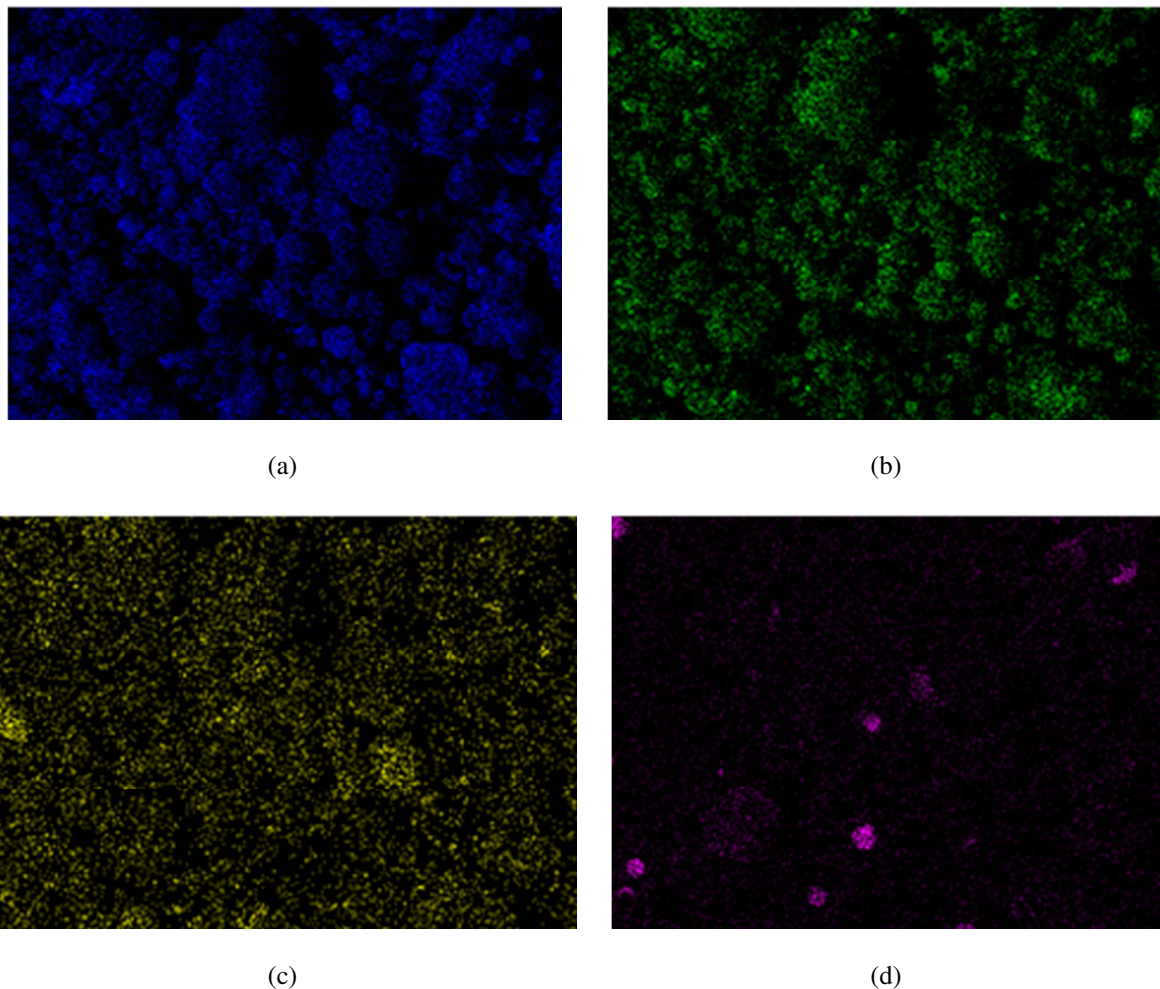


Figura 23 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes da cinza volante (a) silício; (b) alumínio; (c) potássio; (d) ferro.

Tabela 16 - Análise quantitativa por EDS da cinza volante.

Elemento	Quantidade estimada em massa (%)
Oxigênio	49,06
Silício	32,30
Alumínio	11,14
Ferro	4,02
Potássio	1,81
Cálcio	1,07
Magnésio	0,59

3.2.4 Lodo de fosfatização (LF)

Para sua utilização como substituição do agregado miúdo, o LF foi submetido a um processo de preparação. Após secagem em estufa por 24h a 100°C, o resíduo passou por uma etapa de moagem em moinho de bolas horizontal e peneiramento passante na malha de abertura 15mm (Figura 24).



Figura 24 - Aspecto visual do LF (a) natural e (b) após moagem.

A caracterização química qualitativa via FRX, realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, apresentou o Ferro como elemento em maior quantidade, conforme indica a Tabela 17. Devido à composição química dos produtos utilizados durante o processo de fosfatização das peças, assim como, os produtos usados durante o tratamento do efluente resultante deste processo, os elementos encontrados estão de acordo com o esperado.

Tabela 17 - Fluorescência de raios-X do Lodo de fosfatização.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Ferro (Fe)	Zinco (Zn) Cálcio (Ca)	Enxofre (S) Magnésio (Mg) Silício (Si) Cromo (Cr) Magnésio (Mg) Fósforo (P)

Através da análise química elementar por espectrofotômetro de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-AES), Brehm et al. (2013) caracterizaram amostras de LF. O processo de digestão da amostra foi realizado com a adição de 20 mL de água régia recém preparada, em chapa elétrica, à temperatura de 200 °C, por um período de 1,5 h. Os elementos que se apresentaram em maior quantidade são o Ferro e o Enxofre. Todos os valores encontrados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Caracterização química via ICP-AES do LF

Parâmetros	LF (mg/g)
Alumínio	4,890
Cromo	0,526
Manganês	1,351
Níquel	0,659
Cobre	0,123
Estrôncio	0,116
Molibdênio	<0,012
Sódio	0,518
Enxofre	22,575
Potássio	0,163
Zinco	6,235
Fósforo	4,861
Ferro	245,3

Fonte: Brehm et al. (2013).

A Tabela 19 apresenta os resultados de massa específica, da quantidade de matéria orgânica presente e da umidade na composição do LF, realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

Tabela 19 - Caracterização do Lodo de fosfatização.

Ensaio	Resultado
Massa específica	2,26 g/cm ³
Perda ao fogo	26,96%
Umidade	11,71%

A análise granulométrica por difração a laser, realizada no LCVM da Unisinos, indicou que a dimensão média de partícula de 44,25 μm e a distribuição granulométrica é apresentada no gráfico da Figura 25. Ao analisar-se a distribuição granulométrica verificou-se que 95% das partículas da amostra apresentam dimensão inferior a 115,7 μm .

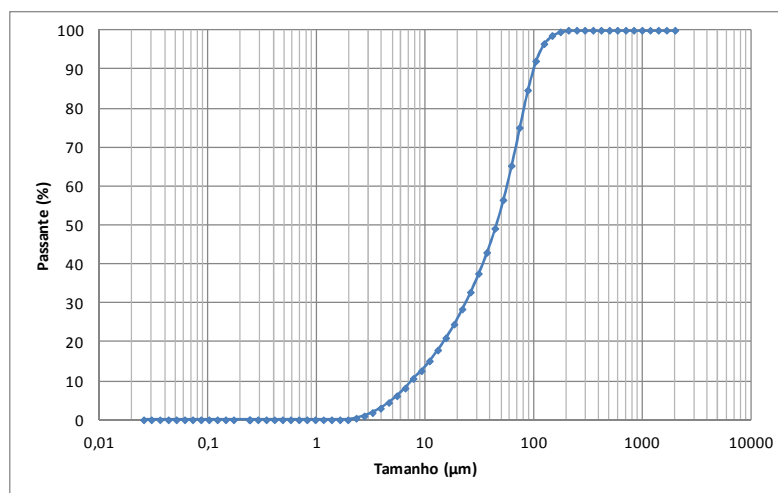


Figura 25 - Distribuição granulométrica do lodo de fosfatização.

A caracterização mineralógica do LF foi realizada no difratômetro Siemens 5000 do Laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Física da UFRGS. A Figura 26

apresenta o difratograma obtido. A análise mineralógica por DRX apresenta uma amostra com característica amorfa, ou seja, a estrutura amorfa provoca espalhamento do feixe, resultando numa bossa e elevação da linha base do difratograma entre os intervalos do ângulo correspondentes aos picos de intensidade. As principais fases cristalinas identificadas foram: calcita (CaCO_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de fósforo (P_2O_5), fosfato de cobre ($\text{CuP}_2\text{O}_{10}$) e quartzo (SiO_2).

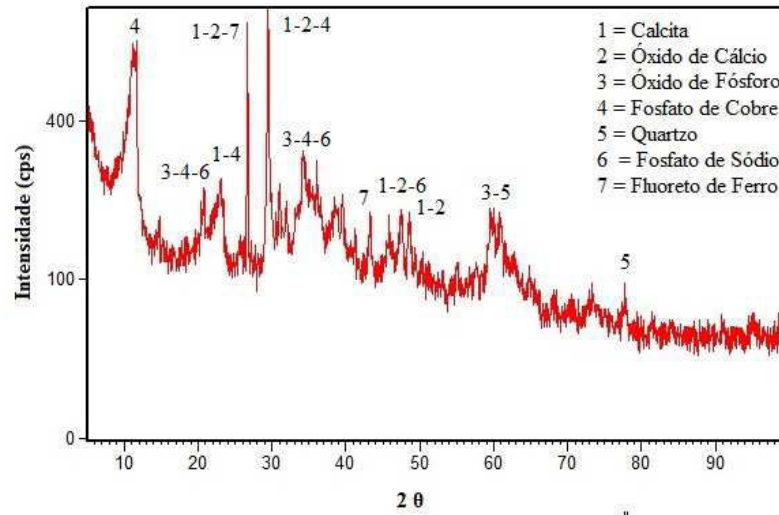
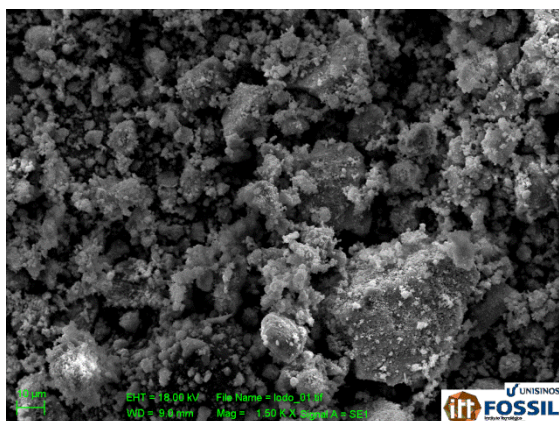


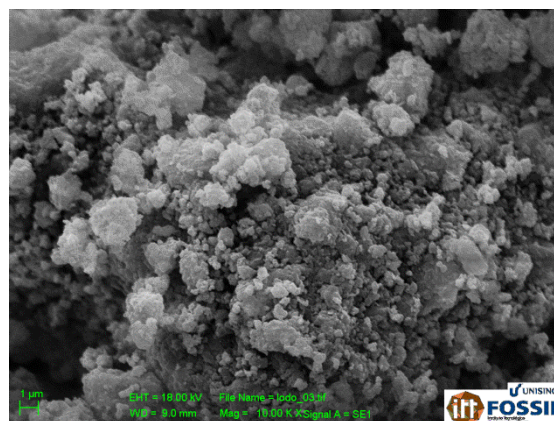
Figura 26 - Difratograma de Raios X do lodo de fosfatização.

O difratograma apresentado e as fases encontradas nesta pesquisa estão de acordo com o trabalho de Brehm et al. (2013).

A Figura 27 apresenta a micrografia do lodo de fosfatização obtida em microscópio eletrônico de varredura, onde é possível observar uma morfologia sem forma bem definida, provavelmente causada pelo processo de moagem a que foi submetido. Pode-se perceber a grande heterogeneidade de tamanhos e pontos de aglomeração de partículas, o que representa uma diminuição da área específica superficial e, portanto da capacidade de fornecer cor.



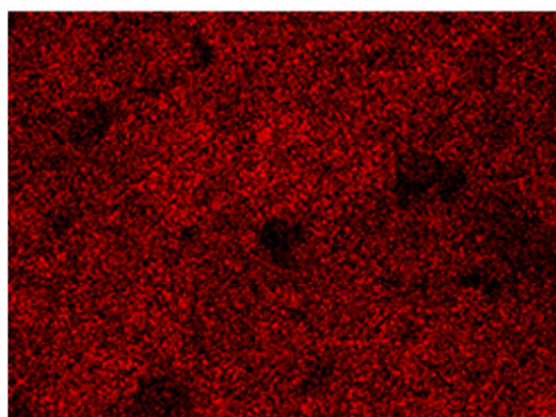
(a)



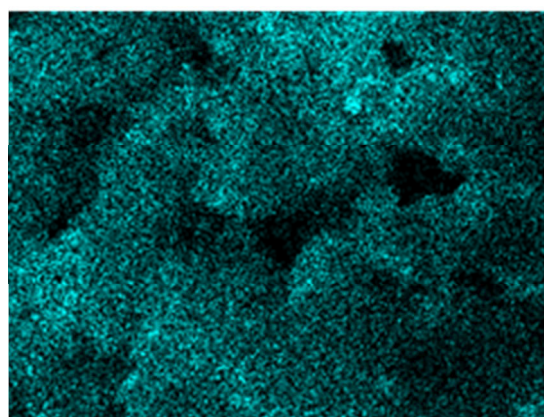
(b)

Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura do lodo de fosfatização (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 10.000x.

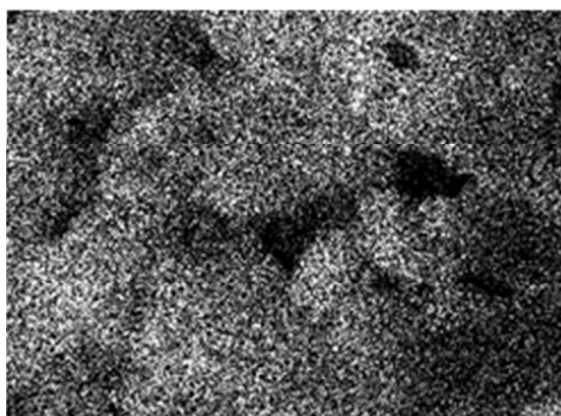
Na análise semiquantitativa por EDS, obtida a partir da imagem 27(b), é possível analisar a distribuição dos principais elementos químicos presentes na amostra.



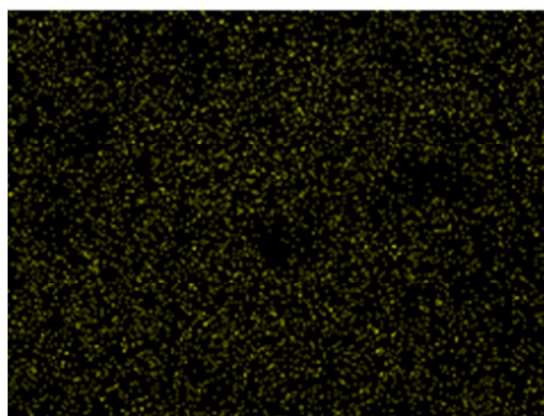
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 28 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes do lodo de fosfatização (a) ferro; (b) oxigênio; (c) magnésio; (d) cálcio.

Tabela 20 - Análise quantitativa por EDS do lodo de fosfatização.

Elemento	Quantidade (%)
Ferro	34,82
Oxigênio	31,67
Magnésio	20,15
Cálcio	6,55
Silício	2,19
Zinco	1,96
Alumínio	1,88
Enxofre	0,79

3.2.5 Pigmento comercial (PG)

Com o objetivo de comparar o efeito da adição de pigmento em algumas propriedades de durabilidade, resistência e cromacidade, utilizou-se um pigmento comercial inorgânico, à base de óxido de ferro sintético, de fórmula química Fe_2O_3 (90%) e coloração alaranjada. Encontra-se na forma de pó (Figura 29) e, segundo o fabricante, possui formato de partícula irregular.

**Figura 29 - Aspecto do pigmento comercial.**

A composição química do PG (Tabela 21) foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, empregando-se a técnica não destrutiva de Fluorescência de Raios X por dispersão de energia (ED-XRF) em um Espectrômetro de Fluorescência de raios X por Energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu do Brasil Comércio Ltda.

Tabela 21 - Fluorescência de raios-X do Pigmento comercial.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Ferro (Fe)	Cálcio (Ca)	Enxofre (S)
	Zinco (Zn)	Magnésio (Mg)
		Fósforo (P)
		Silício (Si)
		Manganês (Mn)
		Potássio (K)
		Cromo (Cr)

A Tabela 22 apresenta o resultado dos ensaios de massa específica, umidade e perda ao fogo do PG, realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

Tabela 22 - Caracterização do Pigmento comercial.

Ensaio	Resultado
Massa específica	4,05 g/cm ³
Perda ao fogo	8,03%
Umidade	1,21%

A Figura 30 apresenta a análise granulométrica por difração a laser do pigmento, onde se verificou que 95% da amostra possui tamanho de partícula inferior a 11,79 μm .

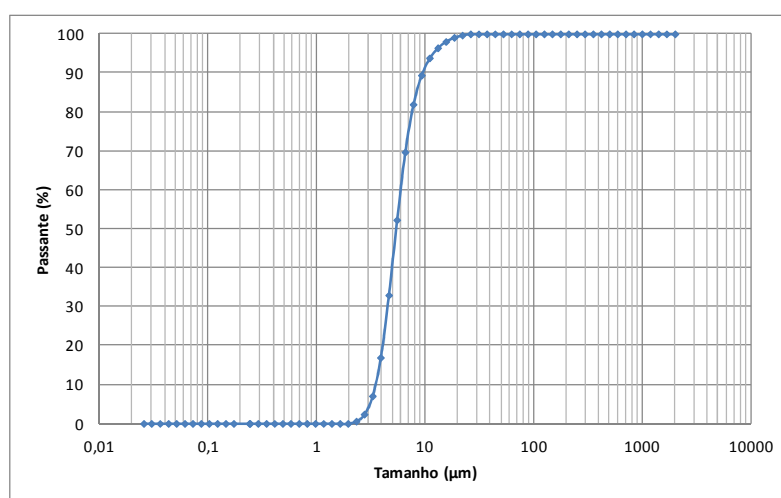


Figura 30 - Análise granulométrica do pigmento comercial.

A identificação das fases cristalinas presentes no pigmento foi obtida por difração de raios X, realizada no difratômetro Siemens 5000 do Laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Física da UFRGS. Conforme visualizado na Figura 31, as fases cristalinas estão associadas à picos estreitos com ângulo de difração definido, apresentando sobreposição dos picos. A análise da difração revelou as fases goethita, e hematita, responsável pela coloração avermelhada do material (OLIVEIRA; FABRIS; PEREIRA, 2013). A tonalidade da goetita depende principalmente do tamanho de partícula que em geral são muito finos, possui uma grande área superficial específica e excelente poder de cobertura, com tons variando de amarelo limão ao ocre escuro (KALEDOVÁ; VESELÝ, 2007).

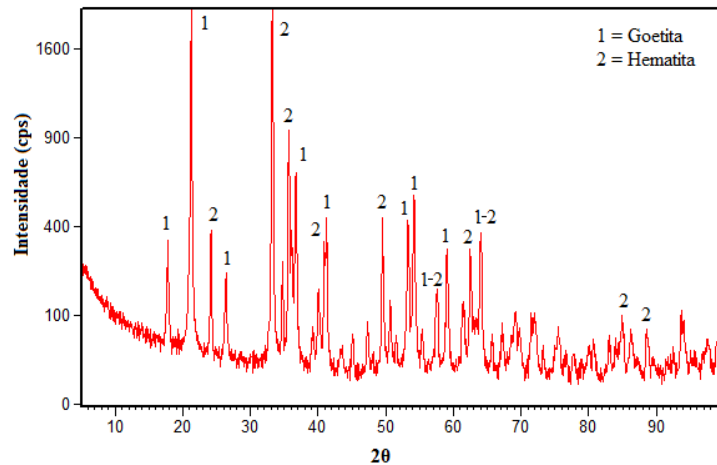
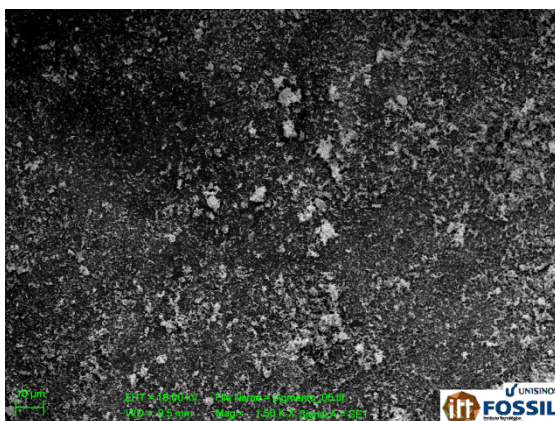
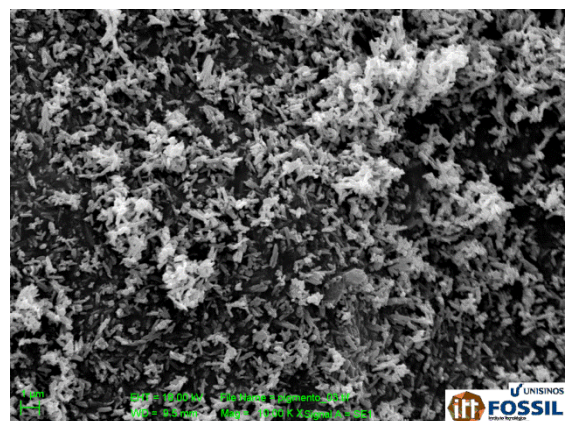


Figura 31 - Difratoograma de Raios X do pigmento comercial.

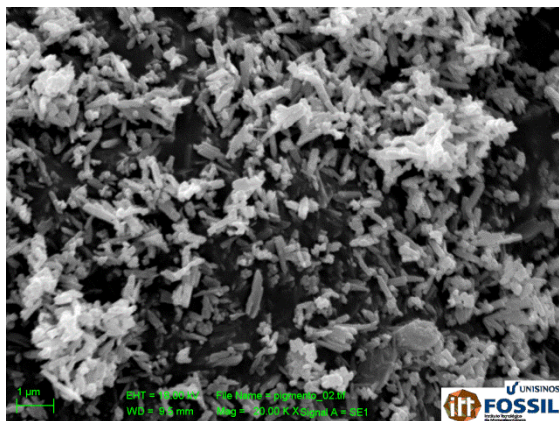
A caracterização microestrutural das partículas de pigmento foi realizada através da técnica de microscopia eletrônica de varredura, no Laboratório ITT Fossil, da Unisinos, e apresentou uma morfologia bastante diferente do lodo de fosfatização. A amostra em forma de pó foi disposta sobre fita de carbono e metalizada com uma fina camada de ouro e paládio. A análise da Figura 32 reflete certa homogeneidade quanto ao tamanho e morfologia regular das partículas, o que pode ser evidenciado também na distribuição granulométrica apresentada na Figura 30. O aumento das Figuras 32(c) e 32(d) permitem observar com maior detalhamento a presença de partículas na faixa de tamanho abaixo de $1\mu\text{m}$, com formato prismático alongado e acicular, apresentando tendência de aglomerar-se em agregados que podem influenciar no desempenho reológico. Este comportamento é característico dos cristais de goethita (BAENA, JIMÉNEZ, RUA, 2008; KALENDOVÁ; VESELÝ, 2007).



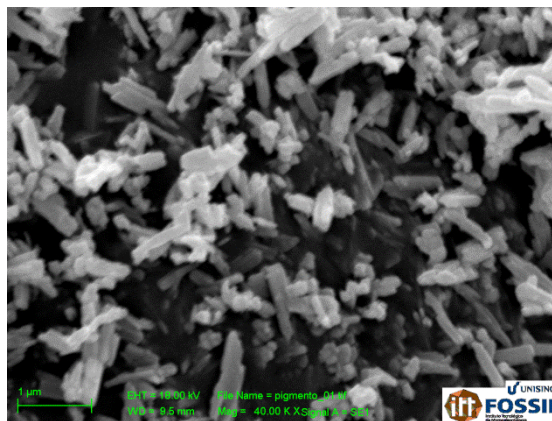
(a)



(b)

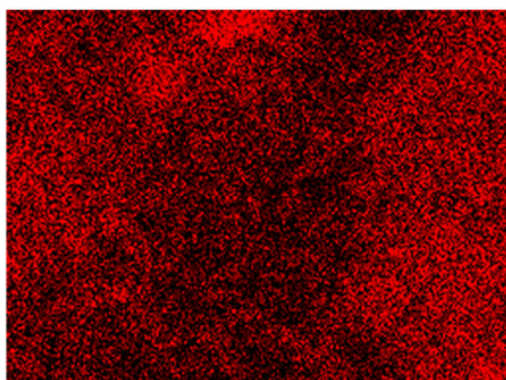


(c)

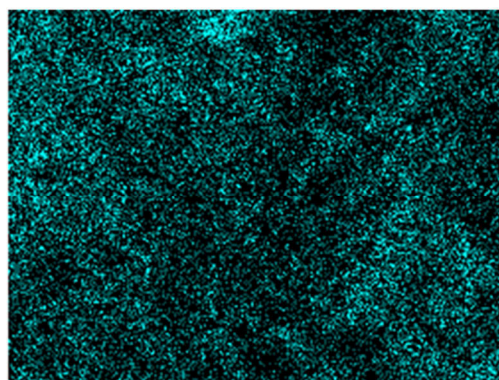


(d)

Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura do pigmento comercial (a) aumento de 1.500x (b) aumento de 10.000x (c) aumento de 20.000x (d) aumento de 40.000x.



(a)



(b)

Figura 33 - Imagens obtidas por EDS ilustrando a distribuição dos elementos predominantes do pigmento comercial (a) ferro; (b) oxigênio.

Tabela 23 - Análise quantitativa por EDS do pigmento comercial.

Elemento	Quantidade (%)
Ferro	77,73
Oxigênio	22,27

3.2.6 Aditivo

Para contornar as questões de demanda de água, em alguns traços tornou-se necessário o uso de aditivo superplastificante, a fim de obter-se uma consistência adequada ao uso. Foi utilizado um aditivo de última geração baseado em polímeros de éteres carboxílicos modificados, isento de cloretos, que proporcionam à mistura um alto poder de fluidificação, garantindo melhor homogeneização dos materiais e assim, uniformidade da cor.

As informações técnicas do aditivo utilizado podem ser visualizadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Dados técnicos do aditivo superplastificante.

Características	Valores
Dosagem recomendada em relação à massa de cimento	8 a 20 ml
Massa específica	1,1 g/cm
Cor	Castanho claro

Fonte: Fabricante

3.2.7 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local de São Leopoldo/RS, onde o órgão responsável pela sua potabilidade é o SEMAE.

3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Algumas pesquisas já realizadas sobre a produção de concreto colorido (LÓPEZ et al., 2009; PIOVESAN, 2009; CARVALHO E CALAVERA, 2002) foram adotadas como ponto de partida para a realização de estudos preliminares com o objetivo de definir um traço adequado. Considerando-se que o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade do LF como material pigmentante em matriz de cimento Portland branco, e por considerar que na produção de concreto colorido não é agregado que é pigmentado, e sim a pasta de cimento que o envolve (FONSECA e NUNES, 1998; LÓPEZ, 2009; SILVA et al., 2012), optou-se por desenvolver a pesquisa na fração argamassa do concreto. Segundo López et al. (2009) como as propriedades de cor são afetadas principalmente pelos materiais finos da mistura, a vantagem da utilização de testes em argamassa é de que os efeitos da areia sobre as propriedades de cor podem ser melhor avaliados. O agregado graúdo geralmente não afeta os aspectos estéticos, a exceção do concreto arquitetônico com agregados expostos na superfície.

A definição desta argamassa foi realizada a partir de um traço experimental de concreto com teor de argamassa de 55%. Este teor é considerado elevado, mas justifica-se pela necessidade de obtenção de um bom acabamento superficial em concretos aparentes. O traço empregado foi obtido com base no teor de argamassa e na relação a/agl estabelecida de 0,40. Utilizou-se um traço intermediário de 1:5 (cimento:agregados).

Quando uma quantidade crescente de pigmento é adicionada a uma mistura de concreto, a intensidade da cor inicialmente aumenta linearmente com a concentração de pigmento. Entretanto, à medida que mais pigmento é adicionado, entra-se em uma faixa na qual a adição de mais pigmento não escurece a tonalidade, tornando-se não econômica (LANXESS, 2002). Por isso é importante estabelecer o intervalo de saturação. Em função do alto poder de coloração do pigmento comercial utilizado, o teor de adição foi fixado em 1% e 5% (valor recomendado pela bibliografia e pelo fabricante), em relação à massa de cimento

com compensação de volume. Para conhecer a porcentagem de pigmentação ótima das misturas com resíduos, a fim de se assemelharem com o pigmento comercial, foram testados três teores de adição: 5%, 10% e 20%, em relação à massa de cimento, com compensação de volume. Em ambos os casos foi feita a compensação através da retirada da mesma quantidade de areia, em volume. É importante salientar que a substituição de uma fração de areia por LF ou PG é caracterizada pela retirada de uma fração de material quartzoso, de composição granulométrica na faixa de 0,3 µm e forma de partícula regular, para a inserção de um material extramente fino e que possui formato de partícula bastante diferenciado.

A fim de garantir uma mesma consistência e plasticidade às argamassas, estabeleceu-se um índice de consistência padrão de 280 mm ± 10 mm, obtido a partir da argamassa de referência, ajustado através do uso do aditivo superplastificante. Mesmo esta sendo uma norma referente a argamassas de revestimento, este parâmetro se justifica, pois esta pesquisa contempla a fração argamassa do concreto.

Como a medição precisa e dispersão homogênea dos pigmentos são fatores importantes na produção de concretos coloridos de boa qualidade seguiu-se um padrão de mistura dos materiais. As mesmas foram realizadas em argamassadeira de eixo horizontal e a colocação dos materiais seguiu a seguinte ordem:

- Pré mistura dos materiais secos;
- Adição de água;
- Adição de aditivo, conforme a necessidade.

Tanto a substituição do cimento por CV quanto do agregado natural por LF ou PG foram realizadas em massa com compensação de volume (Equação 3), em função da diferença significativa entre as massas específicas dos materiais. Desta forma é possível manter constante o volume de pasta de aglomerante.

$$M_a = \frac{M_b}{\gamma_b} \times \gamma_a$$

Equação 3

Onde:

M_a – massa de material;

M_b – massa de material a ser substituído;

γ_a – massa específica do material;

γ_b – massa específica do material a ser substituído.

Tabela 25 - Quantitativos de materiais para os traços estudados.

Nome	Cimento (kg)	Areia (kg)	CV (kg)	LF (kg)	PG (kg)	Água (kg)	a/agl	Aditivo (%)
REF	1,00	2,30	-	-	-	0,40	0,40	-
CV0_LF5	1,00	2,26	-	0,04	-	0,40	0,40	5,81
CV0_LF10	1,00	2,22	-	0,07	-	0,40	0,40	7,14
CV0_LF20	1,00	2,13	-	0,15	-	0,40	0,40	19,37
CV0_PG1	1,00	2,29	-	-	0,01	0,40	0,40	5,20
CV0_PG5	1,00	2,26	-	-	0,07	0,40	0,40	5,48
CV10	0,90	2,30	0,06	-	-	0,38	0,40	5,98
CV10_LF5	0,90	2,26	0,06	0,04	-	0,38	0,40	6,15
CV10_LF10	0,90	2,22	0,06	0,07	-	0,38	0,40	12,20
CV10_LF20	0,90	2,13	0,06	0,15	-	0,38	0,40	11,80
CV10_PG1	0,90	2,29	0,06	-	0,01	0,38	0,40	4,76
CV10_PG5	0,90	2,26	0,06	-	0,07	0,38	0,40	7,00
CV20	0,80	2,30	0,12	-	-	0,37	0,40	4,40
CV20_LF5	0,80	2,26	0,12	0,04	-	0,37	0,40	9,68
CV20_LF10	0,80	2,22	0,12	0,07	-	0,37	0,40	12,18
CV20_LF20	0,80	2,13	0,12	0,15	-	0,37	0,40	14,03
CV20_PG1	0,80	2,29	0,12	-	0,01	0,37	0,40	7,20
CV20_PG5	0,80	2,26	0,12	-	0,07	0,37	0,40	5,98

É importante salientar que em todos os traços estudados a relação a/agl foi mantida constante igual a 0,40. Entretanto, quando se manteve o volume de aglomerante constante, a massa de aglomerante diminuiu, visto que a CV possui massa específica menor que a do cimento. Dessa forma, a relação a/agl foi mantida constante em massa, o que leva à uma pequena diminuição do volume de água e, conseqüentemente da pasta. Esta variação é na ordem de 1% e 2% considerando-se 10% e 20% de cinza volante, respectivamente.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com lâminas de vidro a fim de evitar a perda de umidade, permanecendo nas fôrmas, na sala de cura úmida, por 24 horas. Após, foram desmoldados, enrolados em plástico filme, embalados em saco plástico e armazenados na sala de cura úmida com temperatura e umidade controladas, onde permaneceram até a data dos ensaios. Este procedimento foi adotado para todos os ensaios, com exceção dos corpos de prova destinados à análise colorimétrica, que foram expostos em ambiente natural, e os corpos de prova de variação dimensional, que conforme a ABNT NBR 15261 (2005), permaneceram em sala climatizada, com temperatura de 23°C (± 2) e umidade 60% (± 5).

Todas as atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, na Unisinos.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

3.4.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram executados conforme a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007). Com o objetivo de avaliar o comportamento da resistência, adotaram-se duas idades de ruptura: 7 e 28 dias. Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos para cada idade de ruptura, com dimensões de 50x100 mm. Os corpos de prova foram desmoldados com 24h de idade e após permaneceram em câmara úmida, embaladas em plástico filme, evitando qualquer contaminação por lixiviação, e lá permaneceram até a data dos ensaios.

3.4.2 Retração

Para a avaliação da variação dimensional, o ensaio de retração foi realizado conforme a ABNT NBR 15261 (2005). Foram moldados três corpos de prova de dimensões 25x25x285mm, e comprimento efetivo, entre as extremidades internas dos pinos de medidas, de 250mm. Os corpos de prova permaneceram nos moldes durante as primeiras 48 horas, em sala climatizada, com temperatura e umidade controladas, protegidas contra a perda de umidade.

As leituras foram realizadas em comparador de expansibilidade com marcador digital de precisão 0,001mm, conforme mostrado na Figura 34. As medições foram realizadas na desmoldagem, aos 7, 14, 21, 28 e 42 dias de idade.



Figura 34 - Ensaio de retração.

A variação dimensional é calculada pela expressão:

$$E_i = \frac{L_i - L_0}{0,25}$$

Equação 4

Onde:

E_i = é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) e expansão (quando positiva), na idade “i”, arredondada ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro;

L_i é a leitura realizada na idade final, em milímetros;

L_0 é a leitura efetuada após a desforma, em milímetros;

i é a idade de leitura.

3.4.3 Absorção de água por capilaridade

O método de ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu o procedimento da RILEM TC 116-PGD (1999). Os corpos de prova permanecem em contato com água, e periodicamente registra-se o aumento de massa pela absorção capilar, através da sua pesagem. A vedação, (cobertura plástica) permite um fluxo unidirecional ocasionado pela rede de poros, ocorrendo saída de ar presente nos poros até o ponto flexível que a cobertura plástica proporciona à medida que a água é absorvida, conforme mostra a Figura 35.

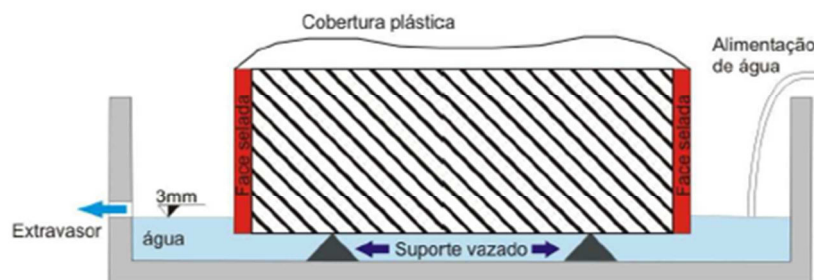


Figura 35 - Sistema experimental do método de absorção capilar.

Fonte: Troian (2010).

Aos 28 dias de cura, o corpo de prova foi serrado ao meio, resultando em amostras de 40x40x80mm. Quatro partes foram mantidas em estufa a 60°C até a estabilização de massa. Após saírem da estufa, permaneceram em dessecador com sílica gel até atingirem a temperatura ambiente, em sala com temperatura controlada (20°C±1°C). Assim que retiradas do dessecador, as laterais das amostras foram seladas com fita adesiva extra forte, de forma a impermeabilizar esta face. Um balão de látex foi colocado na superfície superior, para que

não houvesse uma interferência da umidade externa na face superior da amostra. A superfície inferior permaneceu em contato com uma lâmina de água, com profundidade de 3 mm.

Conforme a Figura 36, para a execução do ensaio foram utilizadas bandejas de plástico, com a colocação de estrados de plástico vazados internamente para que a água pudesse acessar a face inferior dos espécimes ensaiados. Um suporte foi utilizado para o abastecimento constante de água.



Figura 36 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade foi acompanhada através da pesagem das amostras nos seguintes intervalos de tempo de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas.

Os valores de massa determinados ao longo do ensaio são apresentados em gráficos em função da raiz quadrada do tempo. Observam-se duas fases distintas, para as quais é possível interpolar duas retas: a primeira atribui-se à absorção inicial e a segunda, à saturação. A interseção dessas duas retas denomina-se ponto de saturação.

A taxa de absorção de água é calculada pelo quociente da inclinação da reta referente à fase de absorção pela área efetiva do corpo de prova, conforme a Equação 5.

$$S = \left(\frac{Reta_1}{a} \right)$$

Equação 5

Onde:

S = taxa de absorção capilar ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}^{1/2}$);

Reta₁ = inclinação da reta referente à fase de absorção;

a = área efetiva do corpo de prova (cm^2)

3.4.4 Resistência à tração na flexão

Para a execução do ensaio de resistência à tração na flexão moldaram-se três corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, conforme a ABNT NBR 13279 (2005), rompidos aos 28 dias de idade. Os corpos de prova foram desmoldados com 24h de idade e após permaneceram em sala úmida, embaladas em plástico filme, evitando qualquer contaminação por lixiviação, e lá permaneceram até a data dos ensaios.

3.4.5 Manutenção da cor

Conforme já descrito nos itens anteriores, o uso de um concreto cromático requer parâmetros de controle especiais que, para concretos convencionais, não são levados em conta. Isto desperta a preocupação com as características cromáticas obtidas pelo concreto em seu estado endurecido.

Os corpos de prova com dimensões de 80x100x40 mm foram submetidos a dois diferentes estados de exposição:

- Ambiente natural: expostos à intempérie, os corpos de prova foram colocados na marquise de um dos prédios do Centro 6, na Unisinos, como pode ser visto na Figura 37.
- Ambiente controlado (testemunho): as amostras foram embaladas e protegidas da iluminação e variação de temperatura, permanecendo em ambiente de laboratório.



Figura 37 - Local de exposição dos corpos de prova destinados ao ensaio colorimétrico.

Com o objetivo de melhor avaliar o comportamento colorimétrico das amostras produzidas e garantir uniformidade na representação da cor, foram realizadas medidas cromáticas com o auxílio de um espectrofotômetro da marca Konica Minolta, modelo CM2

600D, apresentado na Figura 38. As leituras foram realizadas na desforma, aos 7, 63 e 126 dias de cura.

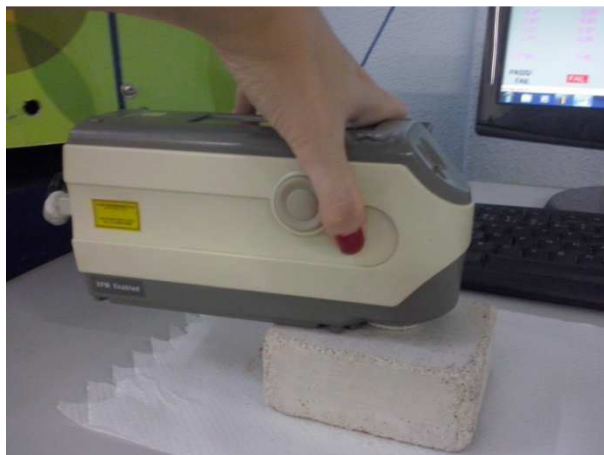


Figura 38 - Leituras colorimétricas com equipamento espectrofotométrico.

Em geral, a luminosidade tende a diminuir segundo o grau de umidade do ambiente e com a ocorrência de precipitações; ao contrário, como altas temperaturas favorecem o processo de evaporação, a luminosidade tende a aumentar (COELHO, 2000). A fim de evitar variações na medição colorimétrica em função das condições climatológicas, antes de cada medição, os corpos de prova expostos à intempérie, foram mantidos por 24 horas em sala climatizada para controle da umidade.

As análises feitas a partir dos parâmetros $L^*a^*b^*$. As medições foram padronizadas utilizando 10° para o observador e D_{65} como fonte de iluminação, considerada como a média da luz do dia. A transferência dos dados coletados para o *software On Color* permitiu a configuração das leituras e o cálculo automático dos parâmetros $L^*a^*b^*$. A partir das medições foi determinada também a diferença de cor (ΔE) em função das variáveis de estudo.

Esta é uma técnica não destrutiva e permite a obtenção de dados sistematizados. As medições foram realizadas sobre um total de três pontos por corpo de prova, na face exposta da amostra, um ao centro e dois nas bordas. Um gabarito foi utilizado para garantir que as leituras fossem realizadas sempre sobre o mesmo ponto.

Nas mesmas datas da medição por espectrofotômetro, foram realizadas imagens obtidas através de máquina fotográfica digital, modelo D80 da marca Nikon, sempre nas mesmas condições de iluminação, exposição e ângulo, mantendo a uniformidade das imagens. Junto ao corpo de prova manteve-se um cartão de cores (preto, cinza e branco) para neutralizar o balanço de branco da fotografia.

3.4.6 Análise estatística

Para a verificação de quais fatores exercem efeito significativo sobre a resposta, foi realizada uma análise de variância, teste que compara estatisticamente a influência de cada fator de controle envolvido no estudo sobre as variáveis de resposta, assim como a existência de alguma interação entre elas a partir dos resultados obtidos. As análises foram feitas na versão de demonstração do software *Statistica 10*, adotando-se um nível de significância de 95%.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. Conforme exposto no capítulo anterior, os materiais estudados nesta pesquisa foram analisados quanto à resistência mecânica, à variação dimensional, à resistência à tração na flexão, à absorção de água por capilaridade e aos parâmetros estéticos de cor e sua variação ao longo do tempo.

Para uma maior confiabilidade da análise dos resultados, o programa experimental foi embasado por um planejamento estatístico. Com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis estudadas, os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software STATISTICA.

Visto que no programa experimental foram utilizados teores diferentes para o lodo de fosfatização e o pigmento comercial, em virtude dos diferentes poderes de coloração, a apresentação será dividida em gráficos e tabelas distintos para estes dois grupos estudados. Serão expostos e analisados apenas os fatores isolados e as interações que obtiveram efeito significativo sobre as variáveis de resposta.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados extraídos do ensaio de resistência à compressão foram primeiramente submetidos a um tratamento estatístico para a eliminação de valores atípicos (afastados uma vez o desvio padrão da média). As médias dos resultados obtidos ao longo das idades são apresentadas na Tabela 26. Todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Tabela A2 (Apêndice).

Tabela 26 - Média dos resultados de resistência à compressão nas idades ensaiadas.

Traço	CV (%)	Teor de LF (%0)	Teor de PG (%)	Média 7 dias (MPa)	Média 28 dias (MPa)
REF	0	0	0	44,0	52,0
CV0_LF5	0	5	0	47,0	49,1
CV0_LF10	0	10	0	44,7	44,6
CV0_LF20	0	20	0	24,7	49,9
CV0_PG1	0	0	1	41,2	52,5
CV0_PG5	0	0	5	49,0	49,5
CV10	10	0	0	41,5	53,1
CV10_LF5	10	5	0	38,8	44,8
CV10_LF10	10	10	0	44,1	53,2
CV10_LF20	10	20	0	43,7	42,8
CV10_PG1	10	0	1	43,0	45,5
CV10_PG5	10	0	5	36,2	48,0
CV20	20	0	0	43,2	55,1
CV20_LF5	20	4	0	31,5	45,5
CV20_LF10	20	10	0	37,2	43,2
CV20_LF20	20	20	0	32,8	39,2
CV20_PG1	20	0	1	43,6	50,6
CV20_PG5	20	0	5	37,9	47,5

Os resultados obtidos para cada tipo de material pigmentante foram analisados através da análise de variância (ANOVA). Todos os fatores isolados e algumas interações de primeira e segunda ordem apresentaram, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo, pois apresentaram valores de “p” menores que 0,05.

Tabela 27 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	771,7	257,2	17,761	0,000000	Sim
CV	2	227,0	113,5	7,835	0,001136	Sim
Idade	1	1352,0	1352,0	93,350	0,000000	Sim
LFxCV	6	479,0	79,8	5,512	0,000209	Sim
LFxIdade	3	55,8	18,6	1,284	0,290405	Não
CVxIdade	2	47,0	23,5	1,621	0,208331	Não
LFxCVxIdade	6	600,5	100,1	6,910	0,000025	Sim
Erro	48	695,2	14,5			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante.

Tabela 28 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2	109,6	54,8	4,612	0,016475	Sim
CV	2	108,5	54,3	4,565	0,017103	Sim
Idade	1	918,4	918,4	77,273	0,000000	Sim
PGxCV	4	119,2	29,8	2,506	0,059100	Não
PGxIdade	2	34,2	17,1	1,438	0,250607	Não
CVxIdade	2	19,5	9,7	0,820	0,448504	Não
PGxCVxIdade	4	161,0	40,2	3,386	0,018891	Sim
Erro	36	427,9	11,9			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; PG = pigmento; CV = cinza volante.

O efeito isolado do fator 'teor de material pigmentante', em relação ao comportamento da resistência à compressão, é apresentado no gráfico da Figura 39, considerando-se todas as idades e teores de cinza volante.

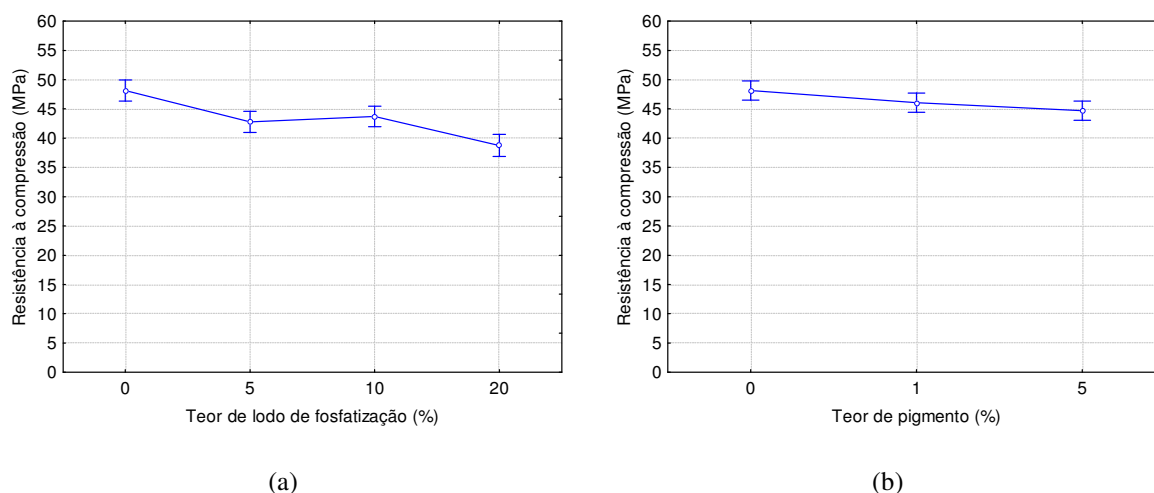


Figura 39 - Efeito isolado da variável teor de material pigmentante no comportamento de resistência à compressão com (a) 'lodo de fosfatização' e (b) pigmento no comportamento

A substituição de areia natural por lodo de fosfatização ou pigmento exerce um efeito negativo, diminuindo a resistência conforme o aumento do teor de substituição para os dois grupos estudados. Para o lodo de fosfatização, a maior queda na resistência à compressão foi registrada para o teor de 20%, que obteve resultado em torno de 19% inferior aos traços que não continham cor. O mesmo ocorre com a substituição de areia natural pelo pigmento comercial onde a substituição de 5% diminui a resistência em cerca de 6%. Segundo Mehta e Monteiro (2008) a resistência à compressão pode ser fortemente influenciada pelas características de forma, textura superficial e granulometria dos grãos. Conforme visualizados nas imagens de MEV, esta queda na resistência pode estar ligada ao formato e ao diâmetro médio das partículas de LF e PG empregados no estudo. O formato das partículas dos

materiais pigmentantes utilizados neste estudo é irregular, podendo alterar a condição de empacotamento, pois se verifica o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies, interferindo na microestrutura do material.

Alguns pesquisadores (LEE, LEE, YU, 2005; PIOVESAN, 2009; SILVA et al., 2012) já realizaram estudos sobre o comportamento mecânico de concretos de cimento Portland branco e pigmentos inorgânicos e, de uma forma geral, esses concretos apresentam características mecânicas semelhantes às dos concretos convencionais.

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam comportamento contrário ao obtido por Silva et al. (2012) em seu estudo em concretos autoadensáveis, onde todos os concretos coloridos apresentaram valores de resistência superiores ao concreto de referência. No entanto, Silva et al. (2012) não apresenta justificativas para tal comportamento.

A Figura 40 apresenta o gráfico de médias para o efeito isolado do fator 'cinza volante' sobre a resistência à compressão, considerando todas as idades e todos os teores para cada grupo de material pigmentante.

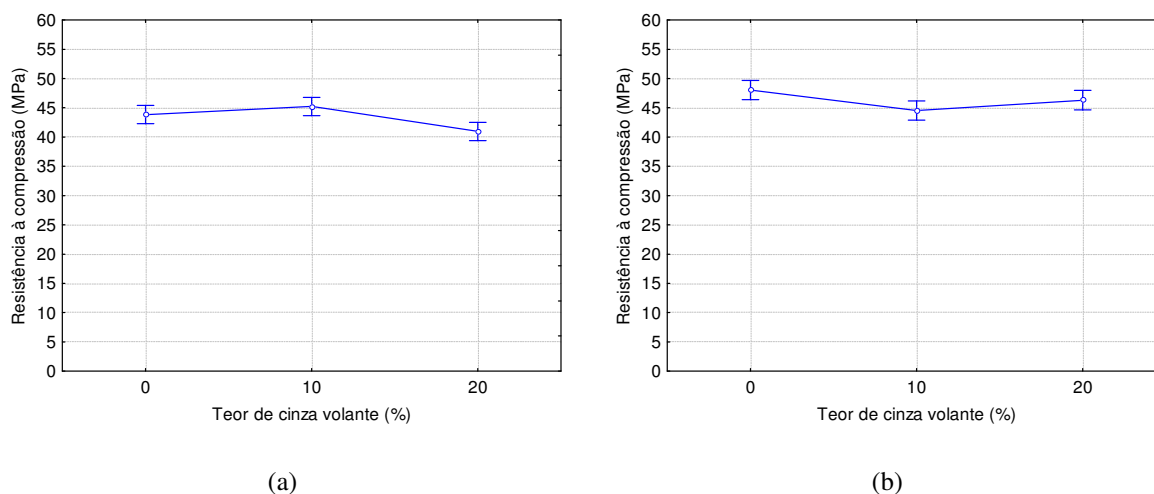


Figura 40 - Efeito isolado da variável 'cinza volante' no comportamento de resistência à compressão axial com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Para a variável LF, a substituição de 10% de cimento por CV, em média, aumenta cerca de 2% a resistência à compressão quando comparados aos concretos sem CV. Contudo, quando são substituídos 20% de cimento, este valor passa a ser aproximadamente, 7% inferior em relação aos concretos sem cinza. Para o PG, a adição de 10% de CV reduziu em 6% a resistência mas para 20% de CV a queda foi de apenas 4%. A justificativa deste comportamento pode ser em função da baixa pozolanicidade do material utilizado nesta pesquisa, indicada pela baixa condutividade elétrica apresentada no ensaio Luxan. Porém, conforme colocado por Castro e Pandolfelli (2009), deve-se atentar que nas primeiras idades a

substituição de cimento por CV pode ser considerada um inerte, ou seja, um material fino mas não aglomerante, uma vez que suas reações químicas não ocorrem na mesma taxa que as reações de hidratação do cimento. Desta forma, o efeito físico provocado pela adição modifica as propriedades dos materiais cimentícios, através do refinamento dos poros resultando em menor porosidade quando no estado endurecido principalmente devido ao seu formato esférico. Dal Molin (2005) também credita as mudanças no desempenho mecânico do material ao efeito microfíler, ao refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento e à alteração da microestrutura da zona de transição causados pela adição mineral.

Este efeito é mais bem compreendido através da análise do efeito isolado da cinza volante na resistência à compressão considerando-se apenas os resultados para o ensaio aos 28 dias de idade, quando as reações pozolânicas já estão ocorrendo.

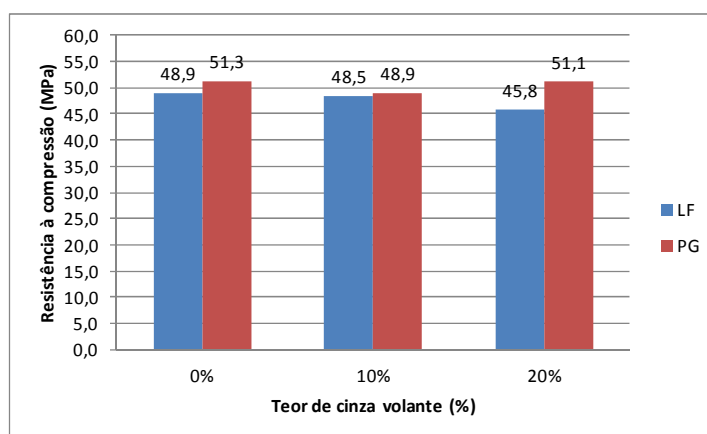
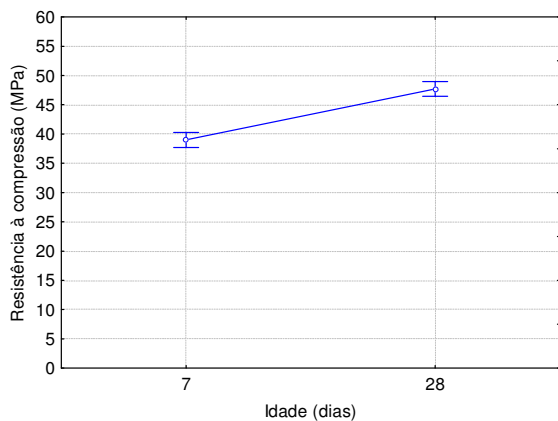


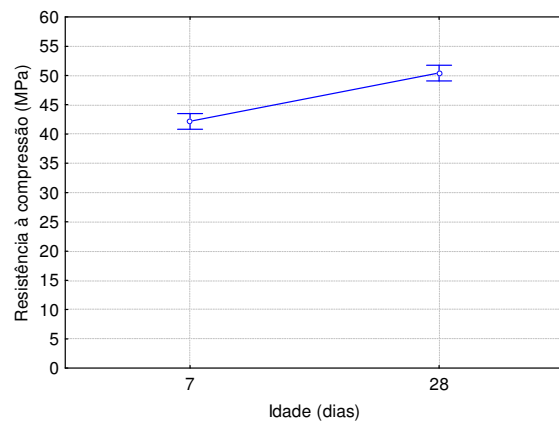
Figura 41 - Efeito isolado da variável 'cinza volante' no comportamento de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, com lodo de fosfatização e pigmento comercial.

Entretanto, mesmo sendo considerada significativa, a substituição de cimento por cinza volante pode representar um ganho ambiental, sem causar grandes perdas de resistência, visto que os valores encontrados se mantiveram na faixa de 40 a 45 MPa e 45 a 50 MPa para o LF e PG, respectivamente.

As médias do fator idade são apresentadas no gráfico da Figura 42, onde é possível observar uma tendência de comportamento já esperada, ou seja, o aumento da resistência à compressão com o aumento da idade.



(a)

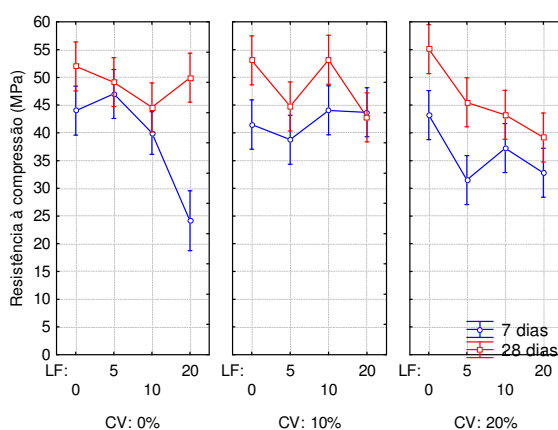


(b)

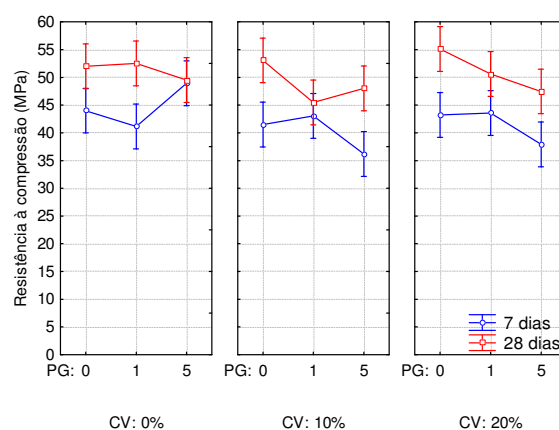
Figura 42 - Efeito isolado da variável 'idade' no comportamento de resistência à compressão axial com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

A análise de variância indicou que este fator apresenta um efeito significativo sobre a resistência à compressão. Este comportamento segue a tendência de comportamento identificada por Piovesan (2009) em concretos de cimento branco pigmentado e por Kirchheim (2003) em concretos de cimento branco, cujos resultados obtidos nos estudos atingiram em torno de 80% da resistência aos 7 dias. Fonseca e Nunes (1998) explicam que este comportamento é esperado para o cimento branco pois a maior finura apresentada por este tipo de cimento lhe confere maior resistência mecânica nas primeiras idades.

A Figura 43(a) e 43(b) apresentam as interações entre as três variáveis estudadas: cinza volante, material pigmentante e idade.



(a)



(b)

Figura 43 - Resistência à compressão em função do efeito da interação entre a cinza volante, o material pigmentante e a idade com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.

Através da análise das interações observadas, comprovam-se os comportamentos já identificados anteriormente. No grupo do LF, percebe-se uma maior variabilidade nos

resultados, uma vez que o material pode estar interferindo nas reações de hidratação. Esse comportamento não deve ocorrer com o PG uma vez que pigmentos inorgânicos são inertes aos demais componentes da mistura. Além disso, pode-se notar que, para as argamassas que não continham nenhum tipo de pigmento, aos 28 dias de idade a interferência da CV foi benéfica, incrementando seus valores de resistência em torno de 2% e 6% com 10% e 20% de CV, respectivamente. Quando foram adicionados os materiais pigmentantes juntamente com a cinza volante é que se observam quedas nas resistências, principalmente com a utilização de 20% de LF que, aos 28 dias teve valores de resistência à compressão 1,3 vezes inferior ao referência. Sendo assim, estudos mais aprofundados sobre o comportamento físico e químico entre as interações dos materiais utilizados são necessárias para explicar com maior precisão as tendências de comportamento identificadas.

Sobre a variável resistência à compressão pode-se concluir que a cinza volante, mesmo tende um efeito significativo nos resultados, não trouxe grande prejuízo às amostras analisadas podendo representar um ganho ambiental. A incorporação de LF representou uma queda nos valores de resistência à compressão superior se comprado ao grupo PG, principalmente com teor de 20% de LF.

4.2 RETRAÇÃO

Os resultados do ensaio de retração foram avaliados através da análise de variância (ANOVA) considerando-se o efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas, e das interações entre elas (Tabela 29, Tabela 30). Os resultados obtidos a partir dos ensaios de retração são apresentados na Tabela A3 (Apêndice).

Para o lodo de fosfatização, apenas o teor de cinza volante, a idade e duas interações de primeira ordem apresentaram efeito significativo. Porém, para o pigmento comercial, todos os fatores isolados e as interações de primeira e segunda ordem entre os fatores estudados apresentaram, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo sobre a variação dimensional.

Tabela 29 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação dimensional com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	0,03167	0,01056	3,02	0,032444	Sim
CV	2	1,07670	0,53835	154,07	0,000000	Sim
Idade	4	0,60816	0,15204	43,51	0,000000	Sim
LFxCV	6	0,62882	0,10480	29,99	0,000000	Sim
LFxIdade	12	0,06458	0,00538	1,54	0,119050	Não
CVxIdade	8	0,09064	0,01133	3,24	0,002241	Sim
LFxCVxIdade	24	0,11862	0,00494	1,41	0,114335	Não
Erro	120	0,41930	0,00349			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante.

Tabela 30 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação dimensional com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2	0,08225	0,04113	152,1	0,000000	Sim
CV	2	0,01429	0,00715	26,4	0,000000	Sim
Idade	4	0,76254	0,19063	705,1	0,000000	Sim
PGxCV	4	0,30507	0,07627	282,1	0,000000	Sim
PGxIdade	8	0,05770	0,00721	26,7	0,000000	Sim
CVxIdade	8	0,04500	0,00562	20,8	0,000000	Sim
PGxCVxIdade	16	0,06618	0,00414	15,3	0,000000	Sim
Erro	90	0,02433	0,00027			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; PG = pigmento; CV = cinza volante.

Os gráficos da Figura 44 apresentam o efeito isolado da variável teor de material pigmentante sobre a variação dimensional.

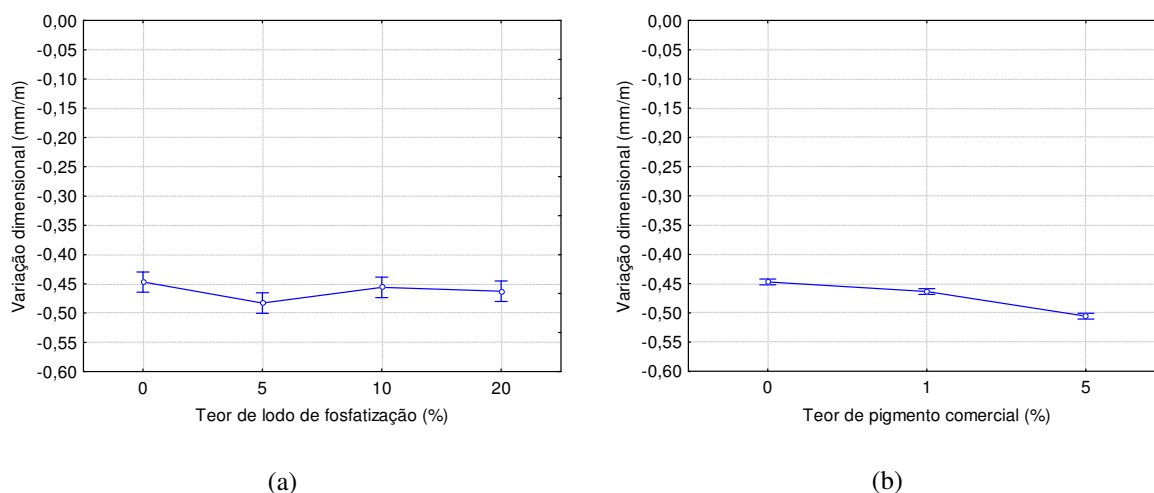


Figura 44 - Efeito isolado da variável 'teor de pigmento' no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Analisando-se isoladamente o teor de adição de material pigmentante verifica-se que o efeito provocado pelo LF indica um acréscimo de 6% com a incorporação de 5%.

Entretanto, apesar de considerado estatisticamente significativo, os teores de 10% e 20% pouco influenciaram a variação dimensional, apresentando respectivamente, valores em torno de 2% e 4% maiores. No grupo do PG, a maior diferença em relação às amostras sem coloração foi registrado para o teor de 5% que apresentou variação dimensional 11% maior.

As amostras com PG apresentaram maiores valores de retração quando comparadas às de LF, provavelmente pelo maior refinamento dos poros, ocasionado pela menor granulometria dos grãos, o que induz a uma maior tensão capilar. Apesar da relação a/agl ser mantida constante, é possível, com a redução do diâmetro dos poros, ter ocorrido uma maior dificuldade para a saída da água do material endurecido, aumentando a tensão capilar e conseqüentemente, aumentando a retração.

Considerando que os materiais pigmentantes foram introduzidos na amostra através da substituição por uma fração de igual volume de areia natural, características como granulometria, forma e textura do agregado podem influenciar de forma indireta sobre a retração do material cimentício uma vez que através do efeito destas características podem exigir uma maior demanda de água na mistura e no presente estudo, trabalhou-se com uma relação de a/agl constante.

O efeito isolado provocado pela adição de cinza volante pode ser observado nos gráficos de médias da Figura 45. A substituição de 10% de cimento por CV foi benéfica para os dois tipos de pigmentos empregados. Entretanto este efeito foi mais intenso nas misturas com lodo de fosfatização do que quando utilizado pigmento comercial, diminuindo cerca de 34% a variação dimensional com o uso de 10% de CV.

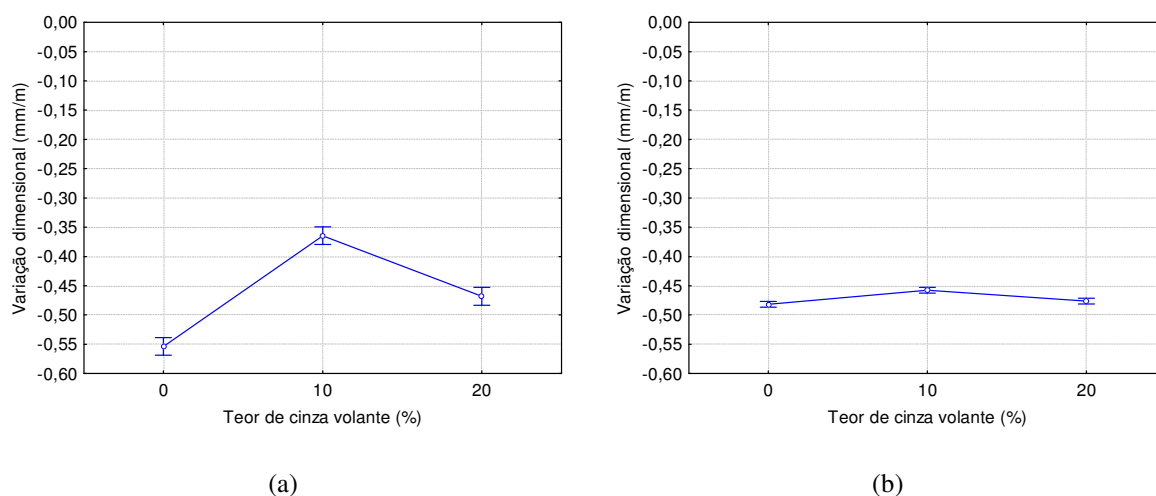


Figura 45 - Efeito isolado da variável cinza volante no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

A adição de CV modifica a cinética de hidratação do cimento, especialmente nas primeiras idades e na, maioria dos casos, resulta na diminuição da temperatura devido ao calor de hidratação já que reagem mais lentamente do que o cimento. Poon et al. (2000) confirmam tal tendência em ensaios realizados em pastas e argamassas contendo CV onde foi detectada a redução no calor de hidratação de até 36% com a utilização de 25% de substituição de cimento por cinza volante. Mehta e Monteiro (2008) creditam a retração nas idades iniciais ao resfriamento da peça resultante da elevação de temperatura gerada pelo calor de hidratação. Uma vez que a substituição de cimento por CV acarreta na diminuição de temperatura, sugere-se que este efeito sobre a retração será menos pronunciado.

Além disso, por apresentar granulometria maior que o cimento utilizado, o efeito da cinza volante altera as propriedades físicas e mecânicas da pasta, e, quando utilizada em conjunto ao LF, proporcionou resultados mais satisfatórios em relação à retração. Como a geometria dos poros está associada principalmente ao tamanho, à forma dos poros e sua organização espacial, esses fatores exercem influência na movimentação e fixação de água no material endurecido e, conseqüentemente, na retração (SILVA, 2011). Ainda por possuir granulometria maior que o cimento, assim como ocorre com o LF, a utilização de CV proporcionou às misturas uma menor tensão capilar. Considerando que a retração ocorre principalmente devido à tensão superficial gerada pela saída de água através dos poros capilares da pasta hidratada, a água tende a deixar os vazios capilares maiores, a tensão capilar se acumula no restante da água devido à ação capilar, dando origem a uma compensação elástica da estrutura de gel sólida e uma alteração do volume total da pasta.

Valores similares para a variação dimensional foram encontrados por Chindaprasirt, Homwuttiwong e Sirivivatnanon (2004) ao trabalhar com teor de CV de 40%, testando, além da cinza volante natural, cinco diferentes finuras obtidas por peneiramento. A incorporação de todas as CV testadas reduziram os valores de retração.

A Figura 46 apresenta o efeito isolado da idade na variação dimensional, onde é possível comprovar a diminuição da retração com o aumento da idade, observando-se uma tendência de estabilização a partir dos 21 dias para os dois grupos de estudo.

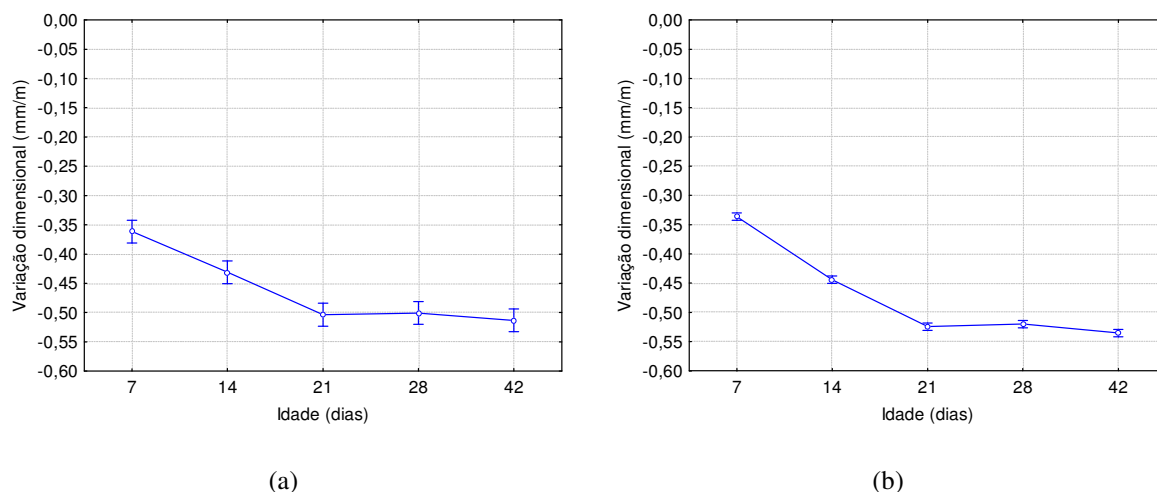


Figura 46 - Efeito isolado da variável idade no comportamento da variação dimensional com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Assim como os resultados encontrados por Dellinhausen et al. (2009) em concretos de cimento Portland branco, constatou-se que a maior parte da redução dimensional ocorreu durante as três primeiras semanas, sendo creditada, principalmente, à perda de parte da água presente devido à cura. Perenchio (2007) comenta que se credita a retração hidráulica nas idades iniciais à tensão superficial dos poros capilares da pasta hidratada. O autor acrescenta ainda que, em se tratando da retração em idades avançadas, considera-se que é causada pela perda de água adsorvida nas superfícies da pasta de cimento hidratada.

O efeito da interação entre as variáveis estudadas é apresentado no gráfico de médias da Figura 47.

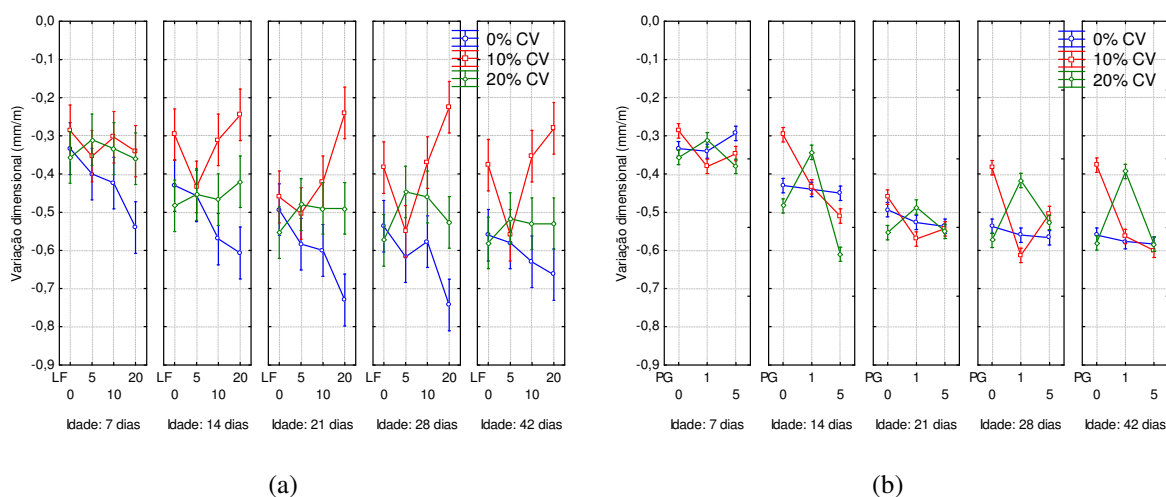


Figura 47 – Variação dimensional em função do efeito da interação entre a cinza volante, o material pigmentante e a idade com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.

Neste caso também se percebe uma maior variabilidade de resultados para o grupo do LF. Entretanto, fica evidente o efeito benéfico da CV na redução da retração, principalmente no teor de 10%, quando associada à incorporação de maiores teores de LF.

Através deste ensaio é possível concluir que a substituição de 10% de cimento Portland branco por CV, apresentou em média valores mais satisfatórios do que as amostras sem CV. A incorporação de material pigmentante não representou maiores variações de valores, mantendo a variação dimensional dentro da faixa de -0,50 a -0,45, para os dois grupos de estudo.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela A4 (Apêndice).

As Tabelas 31 e 32 apresentam a análise de variância (ANOVA) para os fatores analisados no experimento, a um nível de significância de 95%, para os dois grupos de estudado.

Tabela 31 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à tração na flexão com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	125,82	41,94	8,497	0,000506	Sim
CV	2	6,02	3,01	0,609	0,551846	Não
LFxCV	6	202,14	33,69	6,826	0,000256	Sim
Erro	24	118,46	4,94			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante.

Tabela 32 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à tração na flexão com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2	28,63	14,32	3,070	0,071274	Não
CV	2	19,21	9,60	2,059	0,156541	Não
LFxCV	4	48,61	12,15	2,606	0,070453	Não
Erro	18	83,95	4,66			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; PG = pigmento; CV = cinza volante.

A análise estatística mostra que para o grupo LF apenas o efeito isolado do fator CV foi considerado não significativo. Já para o grupo PG, nenhum dos fatores isolados e a interação de primeira ordem demonstraram significância sobre a variável resistência à tração na flexão.

A influência do teor de adição de material pigmentante é apresentada nos gráficos da Figura 48.

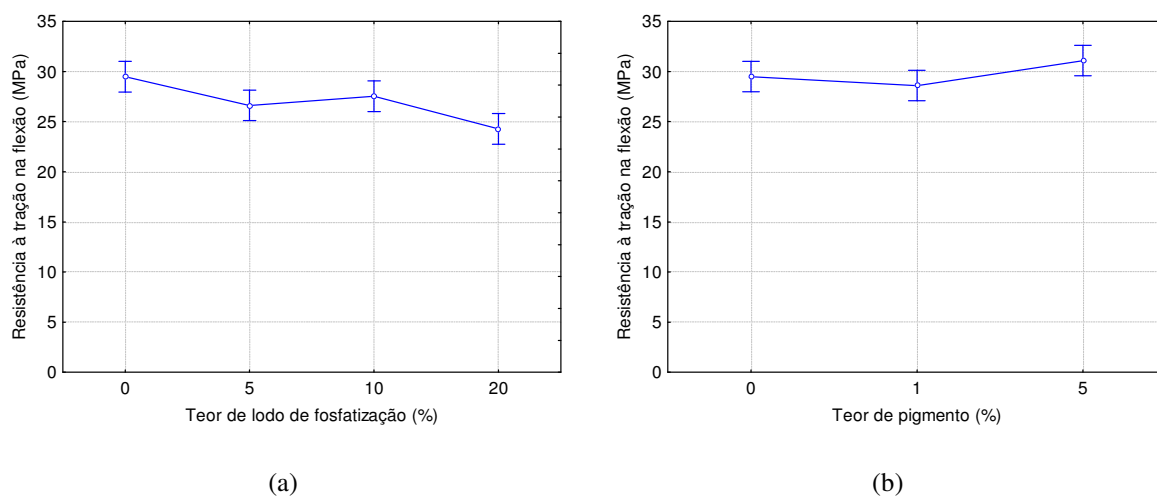


Figura 48 - Efeito isolado da variável teor de material pigmentante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.

Pode-se notar um distinto comportamento para os dois casos estudados. Considerado significativo, o aumento no teor de lodo de fosfatização resulta numa diminuição da resistência à tração, ou seja, 20% de LF apresentou uma queda de aproximadamente 17% quando comparado às misturas sem cor. Entretanto, com a utilização de 5% de pigmento comercial, houve uma elevação não significativa de 10% na resistência à tração. Um pequeno aumento, porém não significativo, também foi observado por Silva et al. (2012) ao incorporar pigmentos líquidos em argamassas de cimento cinza.

O efeito isolado do fator cinza volante em relação ao comportamento da resistência à tração é apresentado no gráfico de médias da Figura 49.

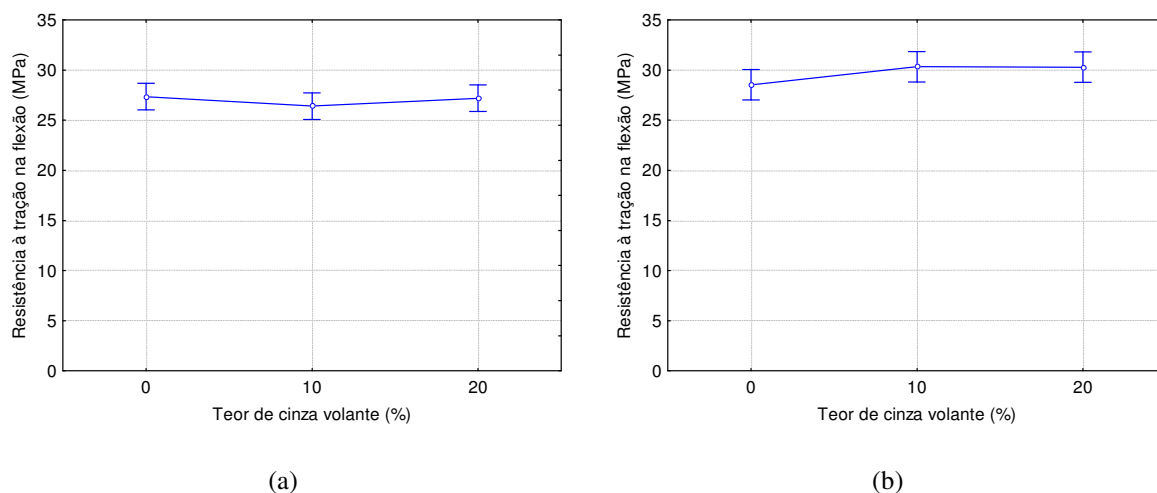


Figura 49 - Efeito isolado da variável cinza volante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

A substituição de 20% de cimento branco pela cinza volante exerce um pequeno efeito, aumentando a resistência em cerca de 1%. Entretanto, a maior eficiência da cinza volante foi observada nas misturas com pigmento comercial, apresentando um acréscimo de 7%. Porém, para ambos os casos, estas diferenças não são consideradas significativas.

Dal Molin (2005) ressalta que a redução na porosidade da matriz e da zona de transição leva a uma melhora geral na resistência à compressão. Contudo, em relação à resistência à tração, esta melhora é relativamente pequena visto que uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local. De acordo com Silva (2010), o aumento significativo da resistência à tração com a utilização de adições minerais somente é observado quando ocorrem as reações pozolânicas, o consumo e a redução do tamanho dos cristais de CH pelas adições minerais, o que acontece em idades mais avançadas.

Analisando-se os efeitos da interação entre o uso de cinza volante e materiais pigmentantes, observa-se um comportamento semelhante nos dois grupos de estudo. A utilização de 10% de CV mantém estável a resistência à tração. Entretanto, o uso de 20% de CV representa uma queda nos resultados, exceto para os teores de 5% de LF e PG que apresentaram aumento de 14% e 23%, respectivamente.

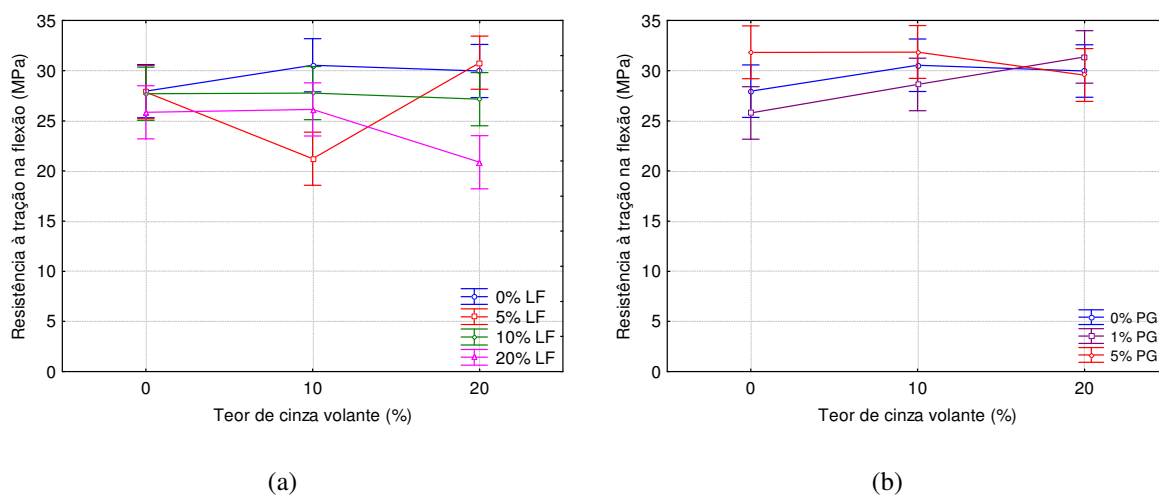


Figura 50–Efeito da interação entre cinza volante e material pigmentante no comportamento de resistência à tração na flexão com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

Estatisticamente, esta interação foi considerada significativa para o grupo do LF e ao contrário, para o PG não foi significativa. Entretanto, apesar de neste trabalho serem apresentados somente os gráficos cujas variáveis são estatisticamente significativas, a Figura 50(b) é mostrada para evidenciar os resultados atingidos do grupo PG. Para o LF nenhuma das combinações de CV e LF obtiveram valores de resistência à tração na flexão superior do

que valores de referência. Entretanto, para o PG, verifica-se menor disparidade entre os valores, sendo que para o teor de 20% de CV, os três teores de adição encontram-se na mesma faixa de resistência, ou seja, entre 28 e 32 MPa.

4.4 TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados de absorção de água por capilaridade foram analisados através da análise de variância (ANOVA) considerando o efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas, e das interações entre eles, indicadas nas Tabelas 33 e 34. As médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água por capilaridade são apresentadas na Tabela A5 (Apêndice).

Tabela 33 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à taxa de absorção capilar com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	0,000507	0,000169	9,18	0,000120	Sim
CV	2	0,004262	0,002131	115,78	0,000000	Sim
LFxCV	6	0,004177	0,000696	37,82	0,000000	Sim
Erro	36	0,000663	0,000018			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante.

Tabela 34 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à taxa de absorção capilar com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	2	0,000859	0,000429	15,78	0,000029	Sim
CV	2	0,002777	0,001389	51,02	0,000000	Sim
LFxCV	4	0,001939	0,000485	17,81	0,000000	Sim
Erro	27	0,000735	0,000027			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante.

Nas Tabelas 32 e 33, é possível verificar que todos os fatores isolados e a interação de primeira ordem apresentaram efeito significativo sobre a taxa de absorção de água a um nível de confiança de 95%. Estes fatores apresentam valores de “p” menores que o nível de significância α igual a 0,05. A Figura 51 apresenta o efeito isolado do teor de material pigmentante em relação à taxa de absorção de água por capilaridade.

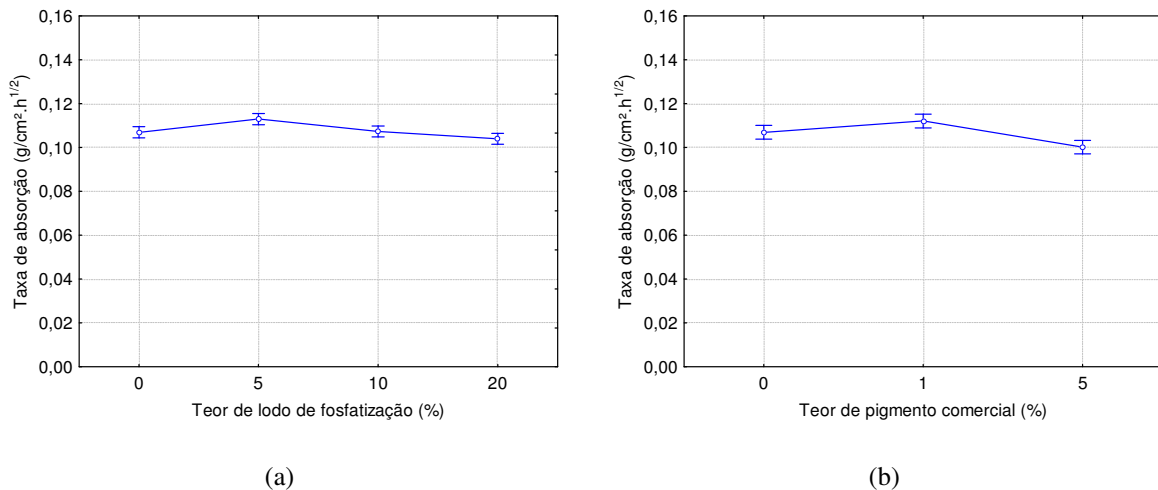


Figura 51 - Efeito isolado do teor de material pigmentante nos resultados de taxa de absorção com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

Através da análise dos gráficos de médias é possível identificar semelhança nos resultados e tendência de comportamento encontrados nos dois grupos de estudo. Apesar de pequena, a incorporação de material pigmentante representa uma diminuição estatisticamente significativa nos valores de taxa de absorção capilar na ordem de 2% e 3% para o LF e PG, respectivamente. No entanto, analisando os resultados sob a ótica de desempenho dos materiais essas diferenças não podem ser consideradas tecnicamente significativas.

Resultados semelhantes foram encontrados por Piovesan (2009) em concretos de cimento Portland branco. O teor de adição de pigmentos verde e vermelho, em teores de zero a 10%, apesar de considerado não significativo sobre a variável taxa de absorção capilar, apresentou valores inferiores quando comparados aos concretos sem adição. Porém, aumenta de forma proporcional conforme o aumento do teor de pigmento. Constatou-se também que a taxa de absorção foi inversamente proporcional à resistência capilar.

Este comportamento pode ser consequência da menor finura dos materiais pigmentantes que proporcionaram um melhor empacotamento. Os resultados encontrados também estão de acordo com a pesquisa realizada por Gonçalves (2000) onde o autor adicionou resíduo do corte de granito em concreto e observou o efeito fíler do material. Com tamanho médio de partícula de 6,74 μ m, o resíduo de corte de granito utilizado assemelha-se ao tamanho de partícula do PG empregado nesta pesquisa, que possui diâmetro médio de 5,39 μ m. O autor explica que a adição de fíler promove um refinamento da estrutura através do preenchimento dos poros causado pelas partículas da adição, ocasionando uma barreira física ao movimento ascendente da água. Porém, em quantidades elevadas, observou-se a

ocorrência da formação de caminhos preferenciais, favorecendo a absorção de água por capilaridade.

Entretanto, a pesquisa de Coelho (2000) analisou a influência da adição de pigmentos vermelho, amarelo e preto em concretos produzidos com cimento Portland branco. O autor verificou um aumento moderado na taxa de absorção nos concretos de cimento branco com pigmento e uma redução na taxa de absorção dos concretos de cimento cinza com pigmento. Porém, estes resultados foram considerados desprezíveis frente ao efeito que apresentou a relação água/cimento.

A análise das médias do efeito isolado da cinza volante é apresentada na Figura 52.

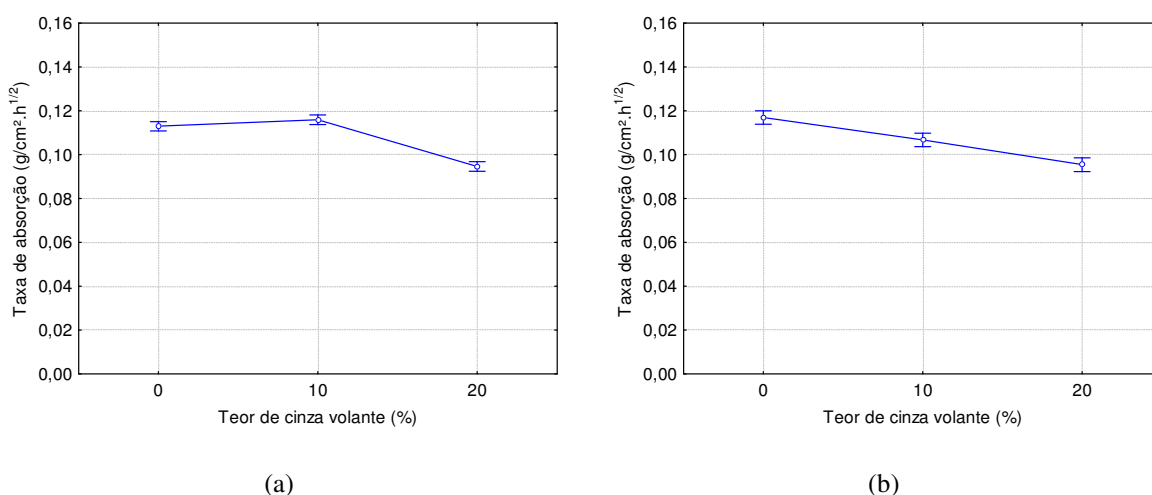


Figura 52 - Efeito isolado do teor de cinza volante nos resultados de taxa de absorção com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

A substituição de 20% de cimento branco por cinza volante representou, para os dois grupos estudados, uma diminuição na taxa de absorção por capilaridade de 13% e 17% par o LF e o PG, respectivamente.

A cinza volante empregada nesta pesquisa possui dimensão média de grãos de 52 μ m, apresentando D10 igual a 11,30 μ m e D95 igual a 132,8 μ m. Desta forma, devido a uniformidade da distribuição granulométrica e o formato esférico dos grãos, pode haver um refinamento da estrutura cimentícia ao preencher diferentes tamanhos de poros, tornando as argamassas mais compactas e menos porosas e conseqüentemente, com uma menor taxa de absorção de água. De acordo com Castro e Pandolfelli (2009), o efeito físico corresponde ao processo de refinamento dos poros associado à reação pozolânica, ou seja, os produtos da reação de hidratação preenchem os espaços capilares grandes, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema.

A absorção capilar em concretos com adição de cinza volante também foi tema do estudo de Azevedo (2002) demonstrando que, assim como neste caso, a inclusão de cinza volante nas misturas atingiu níveis inferiores de absorção aos da composição de controle, contribuindo para a diminuição da porosidade capilar. O autor atribui tais resultados ao aumento do volume de aglomerante, uma vez que a substituição de cimento por CV foi feita em massa e as cinzas volantes são dotadas de menores massas volumétricas. Entretanto, esta não pode ser uma explicação aplicável ao presente trabalho, já que a substituição foi feita em massa com compensação de volume, mantendo-se o volume de pasta constante. Outra explicação encontrada pelo mesmo autor é a redução da quantidade de hidróxido de cálcio na pasta endurecida, proporcionada pelas reações pozolânicas das CV, o que torna os concretos menos permeáveis, pois passam a conter menor quantidade de um composto que, apesar de pouco, é solúvel na água. Concluindo ainda que a adição de valores superiores a 20% de CV parece não beneficiar o comportamento destas composições.

Os gráficos apresentados na Figura 53 ilustram o efeito da interação entre a cinza volante e o teor de material pigmentante sobre a taxa de absorção capilar.

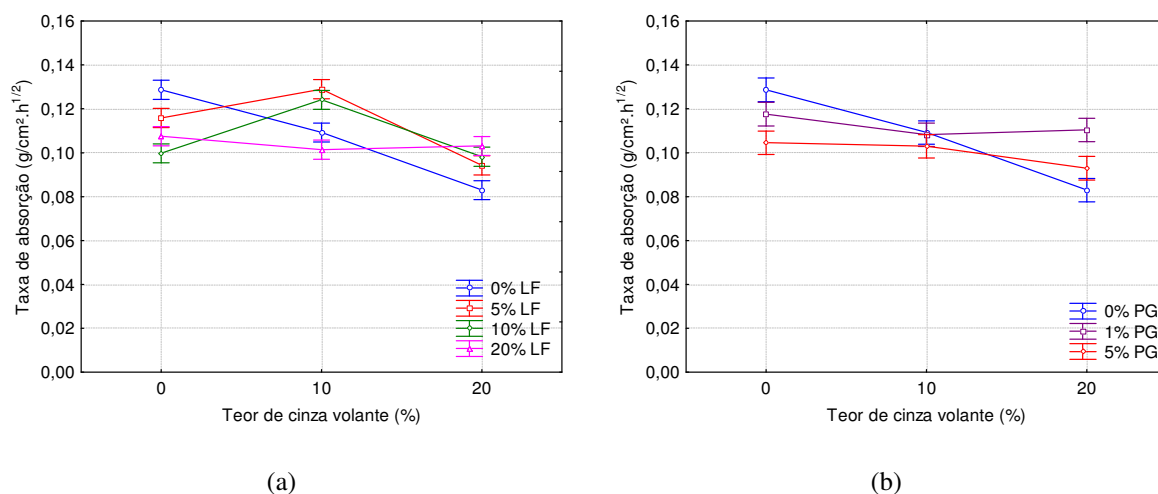


Figura 53 – Taxa de absorção capilar em função do efeito da interação entre a cinza volante e o material pigmentante com (a) lodo de fosfatização; (b) pigmento comercial.

Observando-se os gráficos de comportamento dos dois grupos (Figura 53), percebe-se que para todos os teores de CV e material pigmentante (LF ou PG) os valores de taxa de absorção capilar mantiveram-se abaixo do referência (0% de CV e 0% de material pigmentante). Isto indica que a utilização de CV além de trazer economia e ganhos ambientais não prejudica o desempenho do material, mantendo os valores na mesma faixa, ou seja, entre $0,08$ e $0,13 \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ tanto para o LF como para o PG. Além disso, sabe-se que a utilização de

CV acarreta em melhoras no comportamento da durabilidade em idade mais avançada, quando ocorrem as reações pozolânicas.

Verifica-se que, para o grupo de estudo do pigmento comercial, a incorporação de pigmentos representou uma diminuição média de 21% nos valores de taxa de absorção capilar. Entretanto, para um mesmo nível de teor de pigmento, o emprego da CV não modifica a taxa de absorção capilar de forma significativa, variando entre 0,11 e 0,12 g/cm².h^{1/2} e 0,09 e 0,10 g/cm².h^{1/2} para 1% e 5% de PG, respectivamente. Comparando-se os teores de pigmento, quanto maior o teor de pigmento menor a taxa de absorção, na ordem de 16%.

Uma hipótese para este comportamento é a substituição parcial da areia, que possui na ordem de 66% dos grãos com tamanho situado entre 300 a 600µm, por partículas de dimensões variando entre 3,48µm (D10) e 11,79µm (D95), com dimensão média de 5,39µm. Ou seja, por menor que tenha sido o teor de substituição, a estrutura granular do agregado foi modificada com tendência a um refinamento do tamanho das partículas. Já que a relação a/agl foi mantida constante, esse refinamento da estrutura granular pode contribuir para a diminuição da porosidade.

Já para os grupos de estudo LF, com substituição de 20% de cimento por CV, todas as amostras com pigmento apresentaram valores superiores do que aquelas que não foram pigmentadas. Para 10% de CV, apenas a amostra com 20% de LF apresentou valor inferior à amostra sem material pigmentante.

4.5 CONTROLE CROMÁTICO

Diversos autores (PCA, 1999; COELHO, 2002; PASSUELO, 2004; HARTMANN E BENINI, 2011) afirmam que a cor final do concreto é o resultado da composição das cores originais dos materiais que o compõe. No caso desta pesquisa, utilizando-se as coordenadas cromáticas L*a*b*, verificou-se a influência do teor de pigmento e do teor de cinza volante, uma vez que os demais materiais utilizados foram fixados. Entretanto, Passuelo (2004) ressalta que os parâmetros cromáticos responsáveis pela cor final do concreto não devem ser uma simples soma dos parâmetros apresentados pelos materiais, visto que, durante o endurecimento do concreto, novas ligações químicas são criadas entre os componentes formando novos produtos.

A determinação da mudança de cor é especificada para uma variação total, sem que se possa saber se as diferenças são devidas à luminosidade (L*) ou à tonalidade. Por isso,

utilizou-se como critério de comparação a variação de cor ΔE e a variação no eixo L^* , tendo em vista que estes são os parâmetros com diferenças mais perceptíveis ao olho humano.

Os resultados obtidos nas medições colorimétricas em todas as idades estudadas são apresentados na Tabela A6 (Apêndice).

4.5.1 Parâmetro L^*

A análise de variância (ANOVA) para o parâmetro L^* é apresentada nas Tabelas 35 e 36, assim como a significância das variáveis de estudo e suas interações.

Tabela 35 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução da luminosidade L^* com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	4058	1353	1538	0,000000	Sim
CV	2	250	125	142	0,000000	Sim
Exposição	1	4	4	4	0,041809	Sim
IDD	3	595	198	225	0,000000	Sim
LF*CV	6	104	17	20	0,000000	Sim
LF*Exposição	3	59	20	22	0,000000	Sim
CV*Exposição	2	9	5	5	0,006945	Sim
LF*IDD	9	34	4	4	0,000112	Sim
CV*IDD	6	49	8	9	0,000000	Sim
Exposição*IDD	3	27	9	10	0,000006	Sim
LF*CV*Exposição	6	52	9	10	0,000000	Sim
LF*CV*IDD	18	149	8	9	0,000000	Sim
LF*Exposição*IDD	9	35	4	4	0,000082	Sim
CV*Exposição*IDD	6	17	3	3	0,005370	Sim
LF*CV*Exposição*IDD	18	41	2	3	0,001546	Sim
Erro	96	84	1			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante, IDD = idade.

Tabela 36 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução da luminosidade L^* com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2	15612,5	7806,3	7161,1	0,000000	Sim
CV	2	42,4	21,2	19,4	0,000000	Sim
Exposição	1	59,5	59,5	54,6	0,000000	Sim
IDD	3	324,6	108,2	99,3	0,000000	Sim
PG*CV	4	48,7	12,2	11,2	0,000000	Sim
PG*Exposição	2	92,5	46,3	42,4	0,000000	Sim
CV*Exposição	2	9,2	4,6	4,2	0,018479	Sim
PG*IDD	6	13,9	2,3	2,1	0,060769	Não
CV*IDD	6	68,4	11,4	10,5	0,000000	Sim
Exposição*IDD	3	62,8	20,9	19,2	0,000000	Sim

PG*CV*Exposição	4	49,2	12,3	11,3	0,000000	Sim
PF*CV*IDD	12	23,2	1,9	1,8	0,068758	Não
PG*Exposição*IDD	6	13,4	2,2	2,1	0,069340	Não
CV*Exposição*IDD	6	34,1	5,7	5,2	0,000165	Sim
PG*CV*Exposição*IDD	12	24,8	2,1	1,9	0,049546	Sim
Erro	72	78,5	1,1			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; PG = pigmento; CV = cinza volante, IDD = idade.

Conforme o esperado, o aumento no teor de pigmento influencia significativamente as características colorimétricas finais. Os gráficos apresentados na Figura 54 apresentam os valores do parâmetro L^* em relação ao efeito isolado do teor de material pigmentante. Para que se pode entender a análise do parâmetro L^* pode-se dizer de uma forma mais robusta que quanto menor o valor deste parâmetro “mais escura é a cor”.

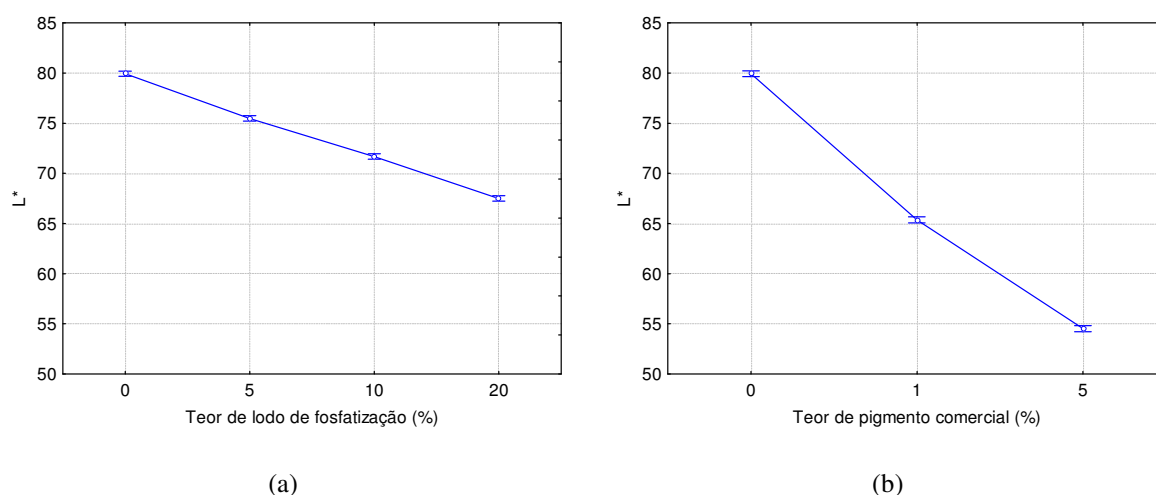
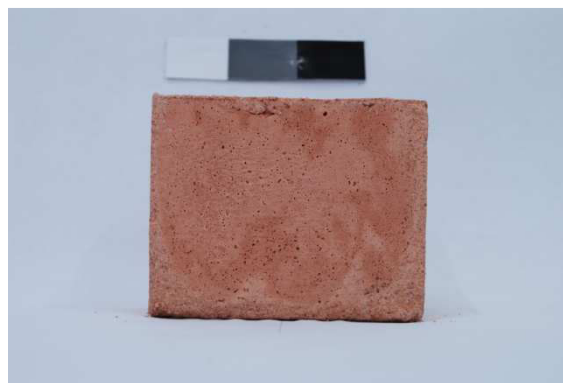


Figura 54 - Efeito isolado do teor de material pigmentante na evolução do parâmetro L^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

A partir da análise dos gráficos nota-se que, à medida que aumenta a quantidade de pigmento mais escura fica a superfície da amostra. Percebe-se também que o PG por apresentar maior poder de coloração, provavelmente justificado pela menor dimensão de suas partículas e maior teor de ferro, uma vez que este aparece como elemento majoritário na análise qualitativa por Fluorescência de raios X, resultou em amostras de tonalidade mais escuras. Com a adição de 5% de material pigmentante, o PG apresentou uma tonalidade mais escura na ordem de 31%. A utilização de 5% de material pigmentante, o PG apresentou uma tonalidade mais escura na ordem de 31%. A utilização de 20% de LF resultou em tonalidade semelhante ao uso de 1% de PG, conforme pode ser confirmado através das imagens digitais realizadas logo após a desforma, apresentadas na Figura 55.



(a)



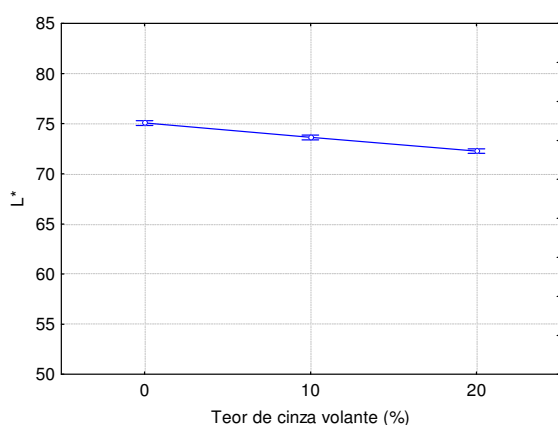
(b)

Figura 55 - Imagens digitais dos traços (a) CV20_LF20 (b) CV20_PG1 após a desforma.

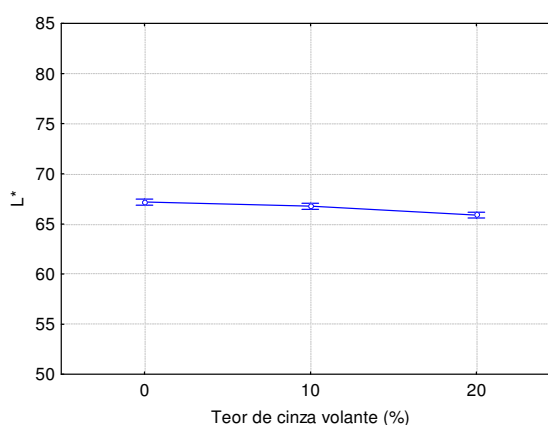
Lopéz et al. (2009) em estudo realizado em argamassas de cimento branco e cinza com adição de pigmentos, confirma que, tal como é indicado na literatura, a saturação tende a permanecer constante após um determinado teor de pigmento.

Através da comparação múltipla das médias (Teste de Duncan), Piovesan observou que com o pigmento vermelho há uma diferença significativa na cromacidade, analisada através do parâmetro L^* , do concreto quando foi aumentado o teor de adição de 3% para 6%. A diferença obtida na cromacidade com o aumento do teor de 6% para 10% não é estatisticamente significativa. Entretanto, o pigmento verde apresenta diferença significativa entres todos os teores utilizados.

Apesar de significativa, a utilização de CV pouco influenciou na tonalidade das amostras produzidas, conforme pode ser visto na Figura 56.



(a)



(b)

Figura 56 - Efeito isolado da cinza volante na evolução do parâmetro L^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

A análise dos resultados indica que a substituição de 20% de cimento branco por CV resultou em perda de luminosidade semelhante para os dois grupos estudados: LF e PG, aproximadamente 3% e 2%, respectivamente. Os resultados desta pesquisa estão em desacordo com os obtidos por Silva et al. (2012) onde foi notável que o aumento no teor de cinza volante escureceu a cor das pastas produzidas com cimento cinza. Este é considerado um resultado satisfatório uma vez que a adição da pozolana parece não interferir na cromacidade do material, trazendo como já visto ganhos técnicos sem perdas quanto ao seu uso estético.

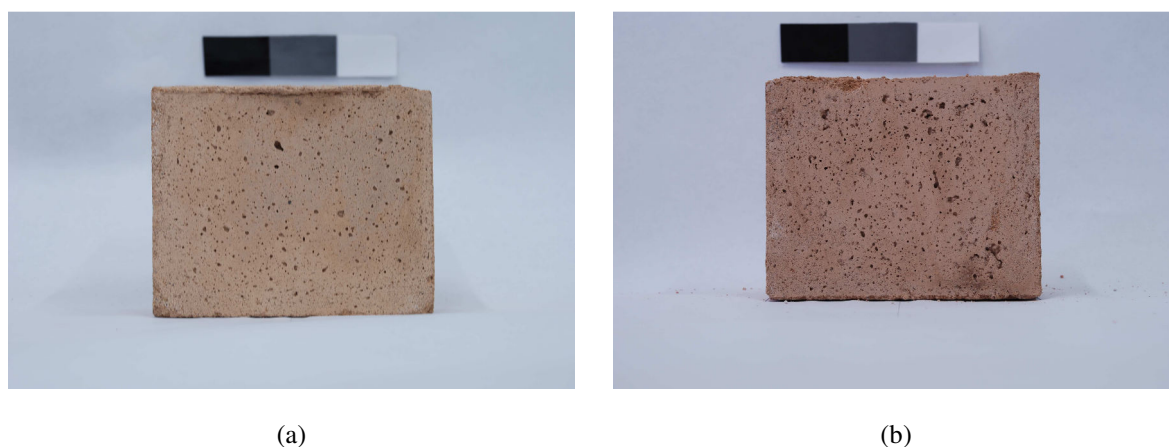


Figura 57 - Imagens digitais dos traços (a) CV0_LF20 (b) CV20_LF20 após a desforma.

Ao contrário do esperado, o parâmetro L^* pouco foi influenciado pelo efeito isolado do tipo de exposição à que foram submetidas às amostras, conforme pode ser visto na Figura 58.

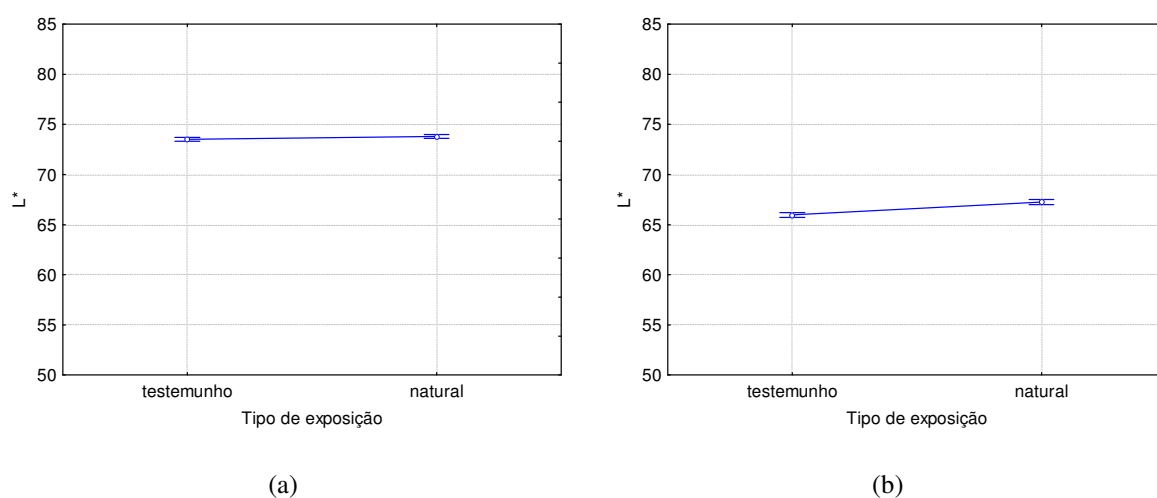


Figura 58 - Efeito isolado do tipo de exposição na evolução do parâmetro L^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

Coelho (2000) considera que os ensaios de envelhecimento à intempérie são os que melhor indicam as variações cromáticas em condições reais. Mesmo sendo considerada

significativa, a mudança de tonalidade entre as amostras testemunho e as expostas às intempéries foi de aproximadamente 1% e 2% para o caso do LF e para o PG, respectivamente (Figura 58). Segundo o fabricante do PG, o óxido de ferro que confere coloração é estável o que levaria a supor que a perda de cromacidade seria menor neste caso. No entanto, a maior perda de cor se deu no PG se comparado ao LF.

O efeito isolado da idade sobre a luminosidade é apresentado nos gráficos de médias da Figura 59.

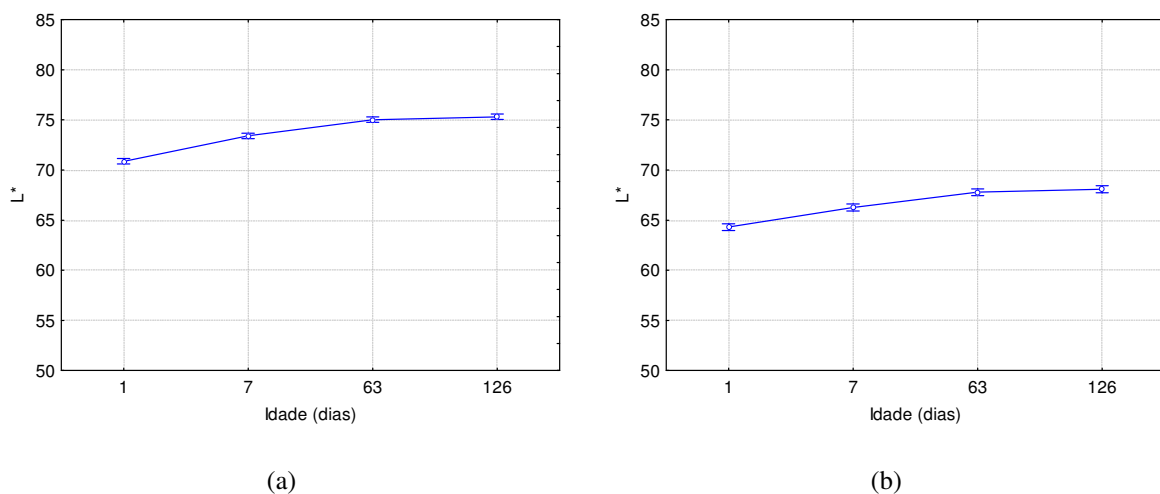


Figura 59 - Efeito isolado da idade na evolução do parâmetro L* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

Observa-se que ao longo do tempo ocorre um acréscimo no parâmetro L*, aumentando a luminosidade do material. O maior percentual de aumento foi registrado nas primeiras idades. Aos 7 dias, este parâmetro aumentou cerca de 4% e 2% para o LF e PG, respectivamente. Dos 7 dias até a última medição, aos 126 dias de idade, o aumento registrado foi em média de 1% com o uso de LF e 3% com o PG, apresentando certa estabilidade a partir dos 63 dias nos dois grupos de estudos.

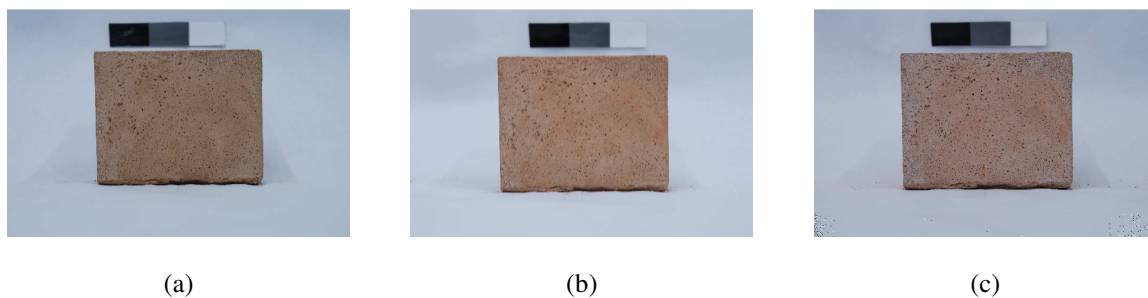


Figura 60 - Imagens digitais do traço CV10_LF20 (a) após a deforma, (b) aos 7 dias de exposição natural, (c) aos 126 dias de exposição natural.

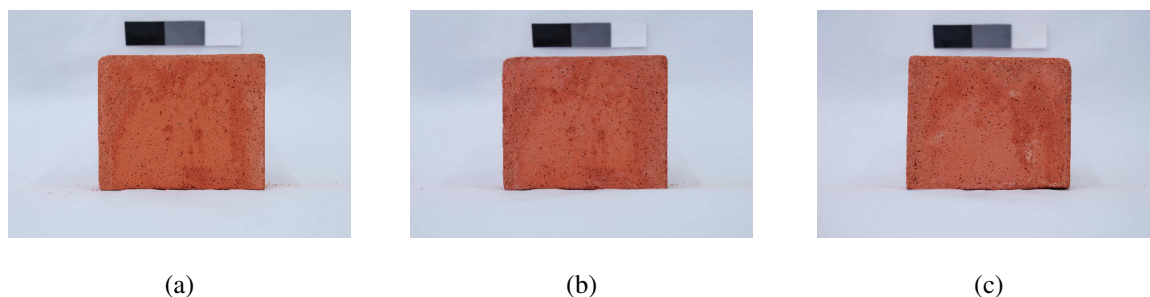


Figura 61 - Imagens digitais do traço CV10_PG5 (a) após a deforma, (b) aos 7 dias de exposição natural, (c) aos 126 dias de exposição natural.

Resultados semelhantes foram encontrados por Coelho (2000) ao realizar pesquisa em concretos coloridos expostos à diferentes tipos de exposição. Neste estudo, de acordo com o autor, a maior parte dos corpos de prova teve uma tendência de aumento na luminosidade na primeira e segunda semana de exposição à intempérie, estabilizando os valores durante as semanas seguintes, ou seja, a maior perda de cromacidade ocorreu no período citado.

O efeito da interação de segunda ordem entre o teor de material pigmentante e o teor de cinza volante sobre a variável de resposta luminosidade é exposto na Figura 62.

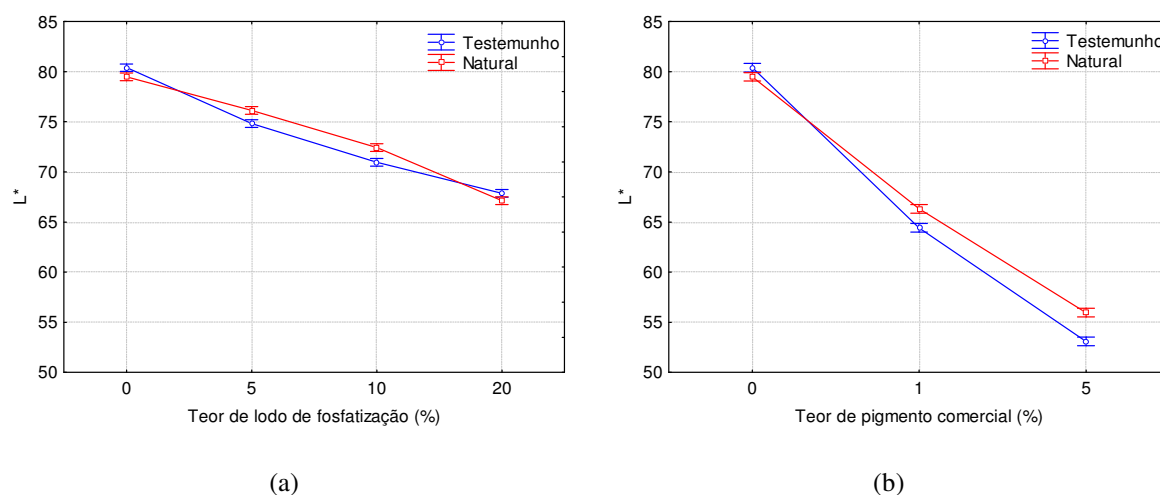


Figura 62 - Evolução no parâmetro L^* em função da interação entre o tipo de exposição e o teor de adição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Apesar de a análise estatística retornar que as diferenças das médias foram significativas, esta análise leva a confirmar que a exposição à intempérie pouco influenciou na perda de luminosidade das amostras, sendo que para o PG esta diferença foi maior, na ordem de 3% e 6% para os teores de 1% e 5%, respectivamente.

Observa-se também que as amostras sem material pigmentante sofreram um comportamento inverso, ou seja, o escurecimento das peças em torno de 1%.

O efeito da interação de terceira ordem entre todos os fatores de controle envolvidos é apresentado nos gráficos de médias da Figura 63, considerando-se a idade final de medição aos 126 dias.

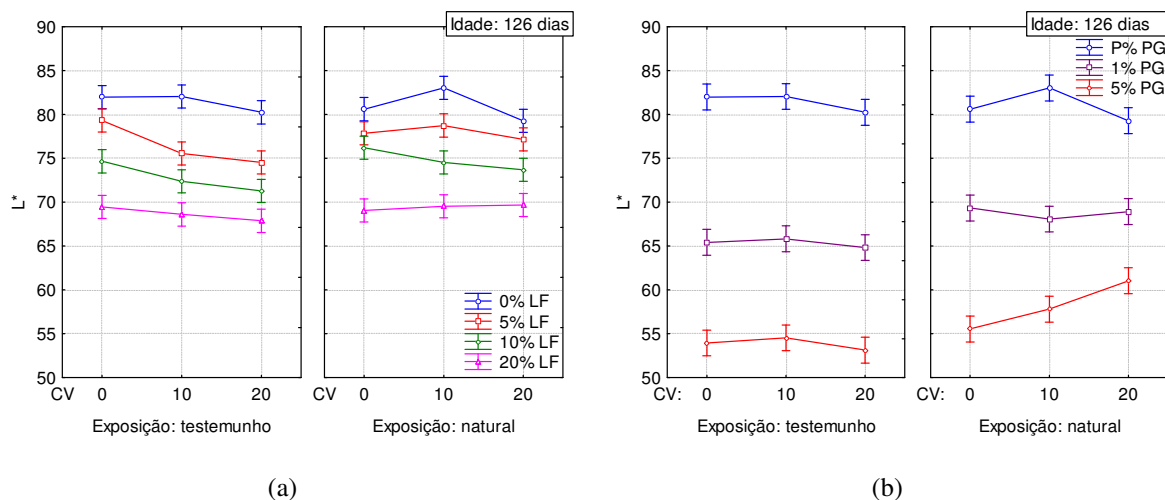


Figura 63 - Evolução no parâmetro L* em função da interação entre o material pigmentante, a cinza volante, a idade (126 dias) e tipo de exposição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Em relação à evolução da cor quanto ao parâmetro L* pode-se concluir que o grupo LF apresentou resultados de luminosidade maiores que os do grupo PG. Observa-se também neste grupo uma menor diferença entre os teores de material pigmentante estudados, sendo que a variação entre 5% e 20% de LF é em média cerca de 9%. Para o grupo PG, esta diferença entre os teores avaliados é em média cerca de 17%. Estes valores confirmam que o PG possui maior poder de coloração que o LF. Entretanto, para o LF foram observadas menores variações quanto ao ambiente exposto. Em relação à adição de CV, observa-se que quanto maior o teor de pigmento, menor é a interferência da CV no resultado final da cor.

4.5.2 Parâmetro ΔE

A modificação cromática global ΔE representa a variação de cor de um material em relação a um padrão de referência. Neste trabalho, o padrão de referência consistiu na comparação dos parâmetros $L^*a^*b^*$ obtidos no ensaio inicial (logo após a desforma) e ao seu término, nas mesmas condições de exposição durante os diferentes ciclos a que foram submetidos. Esta comparação permite estabelecer os incrementos ou diminuições dos parâmetros e suas implicações cromáticas. Todos os resultados são obrigatoriamente positivos uma vez que resultam da hipotenusa formada pelas coordenadas ΔL^* , Δa^* , Δb^* .

Com os dados colorimétricos obtidos nas leituras espectrofotométricas, realizou-se a análise de variância (ANOVA), apresentada nas Tabelas 37 e 38.

Tabela 37 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação colorimétrica ΔE com lodo de fosfatização.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	3	75,788	25,263	16,020	0,000000	Sim
CV	2	248,433	124,216	78,769	0,000000	Sim
Exposição	1	112,272	112,272	71,195	0,000000	Sim
IDD	2	67,675	33,837	21,457	0,000000	Sim
LF*CV	6	384,374	64,062	40,624	0,000000	Sim
LF*Exposição	3	21,717	7,239	4,590	0,005365	Sim
CV*Exposição	2	48,782	24,391	15,467	0,000003	Sim
LF*IDD	6	6,574	1,096	0,695	0,654518	Não
CV*IDD	4	10,616	2,654	1,683	0,163312	Não
Exposição*IDD	2	7,262	3,631	2,302	0,107340	Não
LF*CV*Exposição	6	88,738	14,790	9,379	0,000000	Sim
LF*CV*IDD	12	12,719	1,060	0,672	0,772254	Não
LF*Exposição*IDD	6	11,883	1,981	1,256	0,288636	Não
CV*Exposição*IDD	4	7,155	1,789	1,134	0,347302	Não
LF*CV*Exposição*IDD	12	11,649	0,971	0,616	0,822216	Não
Erro	72	113,541	1,577			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; LF = lodo de fosfatização; CV = cinza volante, IDD = idade.

Tabela 38 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à variação colorimétrica ΔE com pigmento comercial.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2	58,161	29,080	15,066	0,000006	Sim
CV	2	208,534	104,267	54,017	0,000000	Sim
Exposição	1	499,488	499,488	258,768	0,000000	Sim
IDD	2	125,916	62,958	32,616	0,000000	Sim
PG*CV	4	49,144	12,286	6,365	0,000285	Sim
PG*Exposição	2	40,852	20,426	10,582	0,000133	Sim
CV*Exposição	2	84,845	42,422	21,978	0,000000	Sim
PG*IDD	4	22,628	5,657	2,931	0,028902	Sim
CV*IDD	4	12,175	3,044	1,577	0,193684	Não
Exposição*IDD	2	35,122	17,561	9,098	0,000393	Sim
PG*CV*Exposição	4	73,501	18,375	9,520	0,000007	Sim
PG*CV*IDD	8	16,285	2,036	1,055	0,408216	Não
PG*Exposição*IDD	4	32,664	8,166	4,231	0,004734	Sim
CV*Exposição*IDD	4	11,508	2,877	1,490	0,217960	Não
PG*CV*Exposição*IDD	8	9,825	1,228	0,636	0,743789	Não
Erro	54	104,234	1,930			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; PG = pigmento; CV = cinza volante, IDD = idade.

Após a análise de variância realizada verificou-se que todos os fatores de controle, e algumas interações de primeira e segunda ordem apresentaram efeito significativo.

Entretanto, para ambos os grupos de estudo, a interação de terceira ordem não apresentou efeito significativo sobre a variável ΔE .

A Figura 64 apresenta o efeito isolado do teor de material pigmentante sobre a variação cromática ΔE , considerando-se todas as condições de exposição, adição de CV e idades.

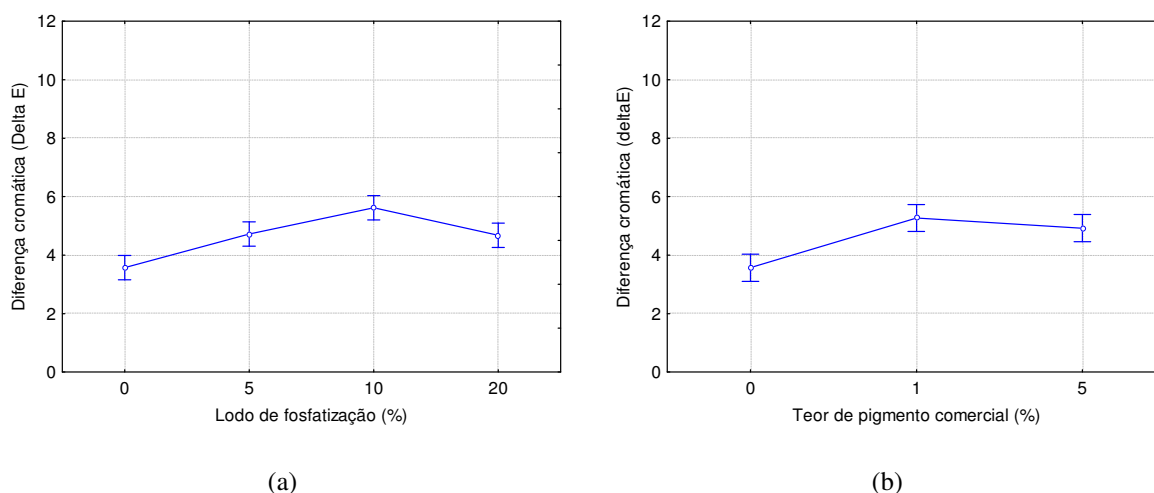


Figura 64 - Efeito isolado do teor de material pigmentante na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

Coelho (2002) afirma que concretos de cimento branco sem pigmento são mais estáveis cromaticamente e que a adição de pigmentos representa uma variação colorimétrica bastante elevada. A análise dos resultados referentes ao efeito isolado do teor de pigmento sobre a variação colorimétrica está de acordo com a colocação feita pelo autor. O menor valor para ΔE foi observado nas amostras que não continham nenhum tipo de pigmento. Entretanto, em relação à amostra sem cor, os teores de 20% de LF e 5% de PG apresentaram valores de variação de cor inferiores aos demais teores testados, cerca de 28% e 42% respectivamente.

Conforme os gráficos da Figura 65, que ilustram o efeito isolado do teor de cinza volante sobre a variável ΔE , o aumento do teor de CV provoca um aumento significativo na variação colorimétrica. Este aumento foi de aproximadamente 50% quando utilizado LF e, 114% para o PG, para um teor de substituição de 20% de cimento branco por cinza volante.

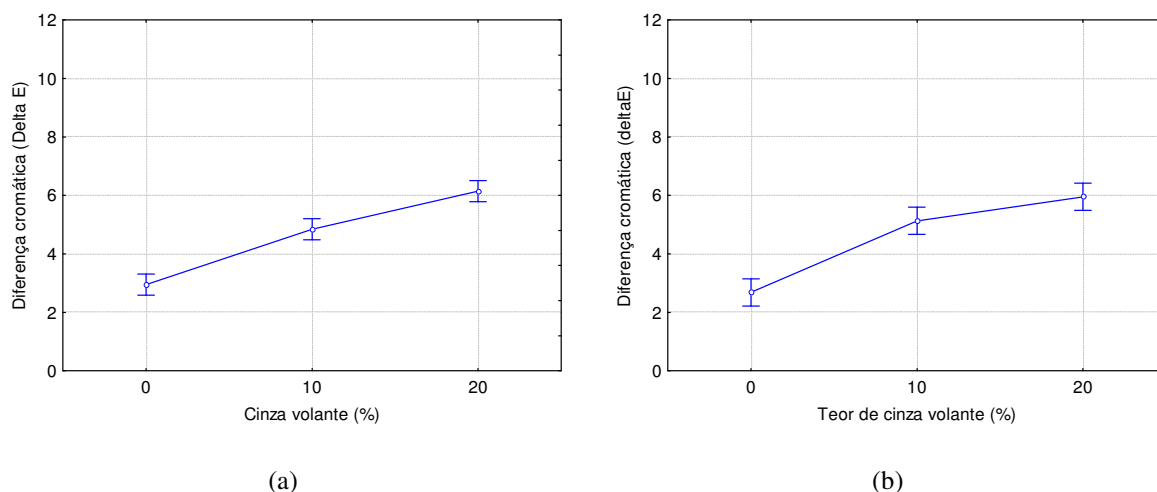


Figura 65 - Efeito isolado da variável cinza volante na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Uma vez que a incorporação de CV pouco influenciou nos resultados da evolução da luminosidade L^* (apresentada na Figura 56) e que os resultados de ΔE são obtidos através da medição das três coordenadas do espaço de cor CIELab, pode-se sugerir que os parâmetros a^* e b^* , responsáveis pela direção da cromacidade na direção verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente, estejam influenciando mais intensamente a variação colorimétrica final das amostras. Como neste estudo optou-se por não apresentar os resultados e análises da evolução dos parâmetros a^* e b^* , a análise de variância e os gráficos dos efeitos isolados quanto à estes eixos estão anexados na Tabela A7 e A8, do Apêndice.

A Figura 66 ilustra o efeito isolado do tipo de exposição a que foram submetidos os corpos de prova.

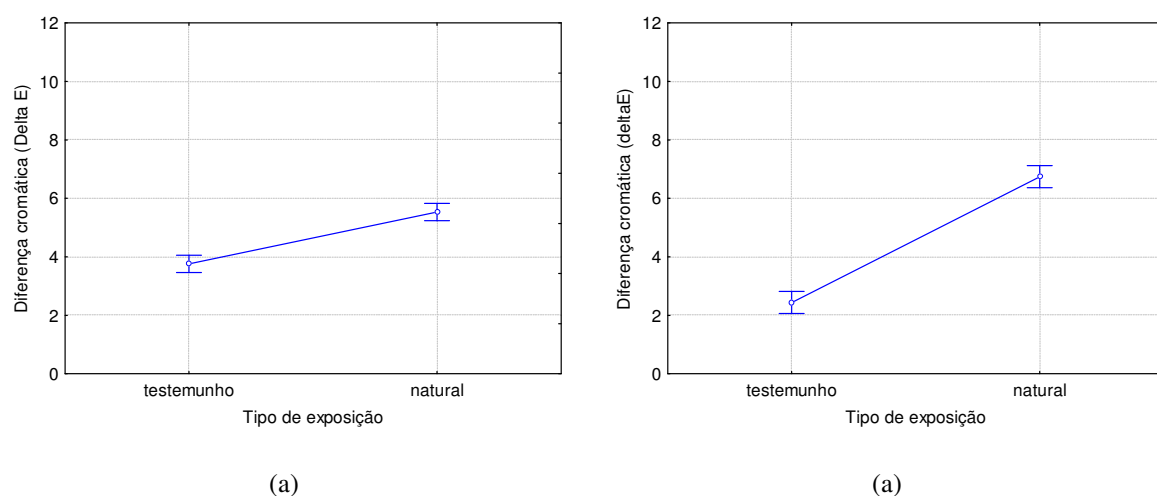


Figura 66 - Efeito isolado da variável tipo de exposição na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Analisando-se o efeito isolado do tipo de exposição a que foram expostos os corpos de prova (Figura 66), observa-se uma significativa diferença entre as amostras armazenadas protegidas e as que foram expostas às intempéries. A variação colorimétrica foi mais acentuada nas amostras com pigmento comercial, apresentando 160% de acréscimo no ΔE . Para as amostras com LF esta diferença cai para 44%. Entretanto, observa-se que para o grupo de estudo LF, mesmo as amostras que foram mantidas protegidas obtiveram valores altos de ΔE , o que indica que podem ter ocorrido reações químicas entre os materiais durante o processo de cura, alterando a cor.

Conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 67, a variação colorimétrica em função da idade mostra que o aumento do ΔE para o LF segue crescendo a cada medição, chegando a 37% até os 126 dias de idade. Entretanto, o PG apresenta um aumento do ΔE mais acentuado até os 63 dias (73%), e a partir de então praticamente se estabiliza, crescendo apenas mais 3% até os 126 dias.

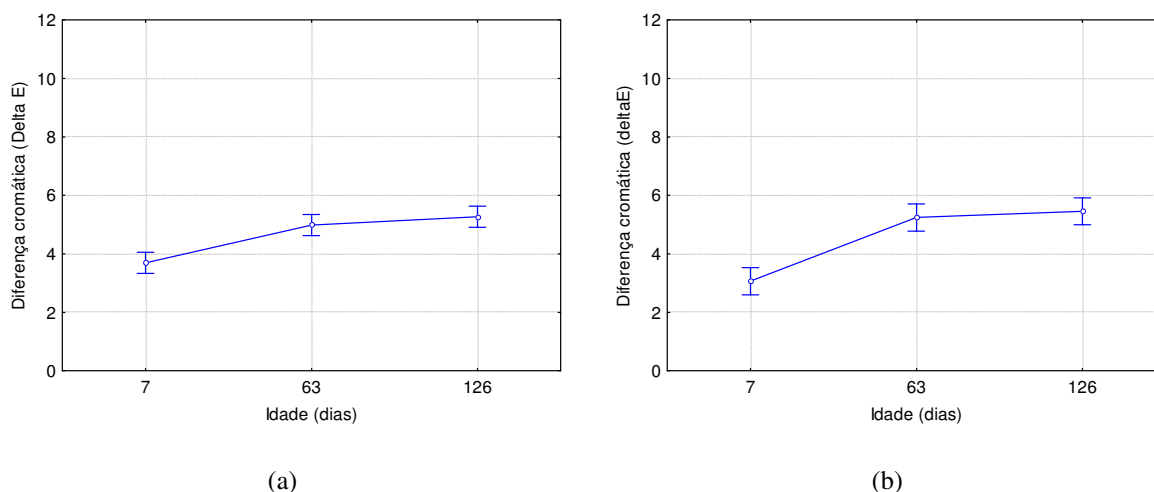


Figura 67 - Efeito isolado da variável idade na variação colorimétrica ΔE com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Com o passar do tempo, a cor nos materiais cimentícios pode sofrer mudanças importantes que afetam a sua estética. Segundo Coelho (2000), estas variações cromáticas podem ser causadas pela aparição de eflorescências na superfície do material assim como pelo processo de carbonatação, entretanto, estes aspectos não foram objetivos desta pesquisa. Mesmo os pigmentos sendo inorgânicos, os mesmos podem apresentar mudanças que afetam a sua cor quando, expostos à intempérie, estão submetidos a condições de contaminação ambiental que podem produzir um processo de deposição de partículas em suspensão em sua superfície.

Deve-se ressaltar, no entanto, que a maior perda de cor registrada durante os três primeiros meses provavelmente passa despercebida pela maior parte dos clientes apesar dos valores de ΔE registrados serem perceptíveis pelo olho humano. Isso acontece porque a perda de cor ocorre de forma gradual, não tendo como forma de comparação a cor original do material.

A interação entre o tipo de exposição e o teor de adição de pigmentos é mostrada nos gráficos da Figura 68, onde é possível perceber a diferença de comportamento entre o LF e o PG.

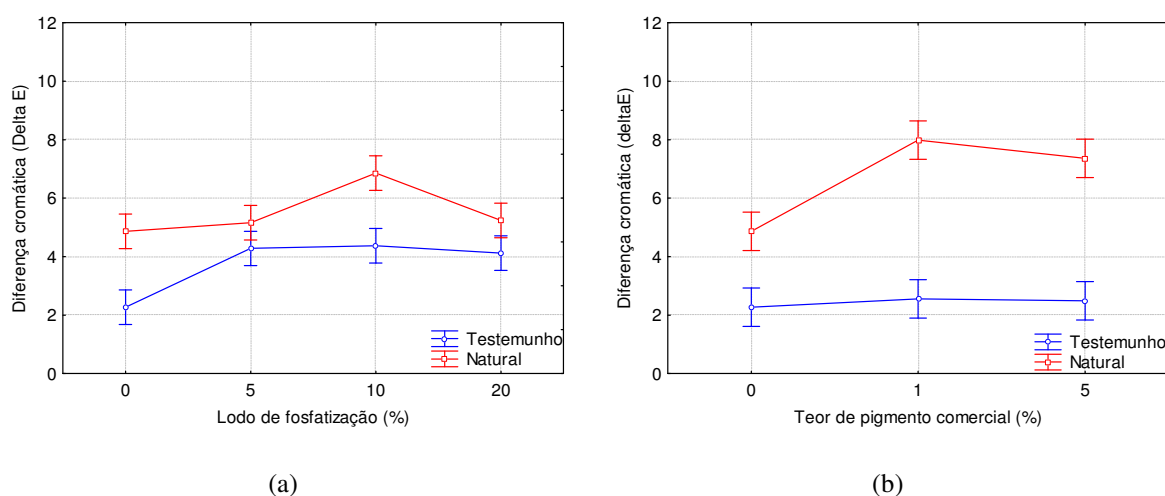


Figura 68 - Variação colorimétrica ΔE em função da interação entre o tipo de exposição e o teor de adição com (a) lodo de fosfatização e (b) pigmento comercial.

Para o LF, mesmo as amostras que foram mantidas em ambiente protegido sofreram variação de cor. A diferença mais acentuada em relação às amostras sem cor foi com teores de 10%, registrando-se para o testemunho e natural, respectivamente, 90% e 35%. A variação ΔE das amostras testemunho de PG permaneceram praticamente estáveis. Entretanto, as que foram expostas à intempérie apresentaram uma variação de cor mais acentuada. Para teores de 1% e 5%, a variação do ΔE foi superior em média 66% e 56%, respectivamente, em relação aos corpos de prova sem cor.

Os resultados obtidos possivelmente sejam justificados pelo teor de ferro encontrado nas amostras e pela diferença granulométrica entre os dois tipos de pigmentos empregados. De acordo com a análise por EDS, o LF e o PG contêm em torno de 34,82% e 77,73% de ferro, respectivamente. Além disso, a difração de raios X realizada no PG apresentou como principais fases cristalinas a hematita e a goethita, que de acordo com Oliveira, Fabris e Pereira (2013), são dois dos óxidos mais estáveis à temperatura ambiente e responsáveis pela coloração vermelha e amarela, respectivamente. Outra hipótese para os

resultados encontrados talvez seja a falta de homogeneidade na distribuição do óxido de ferro do LF, uma vez que apenas uma fase contendo ferro foi identificada na análise da difração de raios X.

Os resultados encontrados são semelhantes aos obtidos por Coelho (2000). O autor observou que, em condições de exposição à intempérie, a variação cromática global é mais evidente em concretos produzidos com cimento branco, principalmente quando ocorre a adição de pigmento vermelho. Os concretos produzidos sem pigmento sofreram menores mudanças cromáticas. Esta mesma tendência foi evidenciada nos outros ambientes de envelhecimento (câmara úmida, ciclos de molhagem e secagem e ultravioleta). Os resultados apresentados indicam que os concretos brancos sem pigmento são mais estáveis cromaticamente.

Sobre a variação colorimétrica ΔE conclui-se que em geral, exposto à intempérie, o grupo PG obteve valores de perda de cor superior 35% se relacionado ao grupo LF. Entretanto, no grupo LF, mesmo os corpos de prova que foram mantidos sob condições controladas de iluminação, temperatura e umidade, apresentaram valores altos de variação colorimétrica. Além disso, maiores teores de material pigmentante e cinza volante também representaram maiores valores para ΔE .

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e sugestões para a continuidade do trabalho

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da viabilidade do uso de lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco associada à cinza volante possui um caráter inovador na pesquisa científica. Sendo assim, os resultados obtidos são válidos para a compreensão do comportamento desses novos materiais. Analisando-se os resultados obtidos no programa experimental e, com base na revisão bibliográfica, são apresentadas as considerações finais que respondem aos objetivos propostos, circunscritas às condições de estudo deste trabalho.

Em relação à **resistência à compressão** a substituição de agregado natural por material pigmentante exerceu um efeito negativo para os dois grupos estudados, com uma diminuição em média de 15% e 6% para o LF e PG, respectivamente.

Sabendo-se que as reações químicas da CV não ocorrem na mesma taxa que as reações de hidratação do cimento, e considerando-se apenas os resultados aos 28 dias de idade, a substituição de cimento Portland branco por CV apresentou resultados satisfatórios para os dois grupos de estudo, mantendo-se na faixa de resistência à compressão de 48MPa a 52Mpa. No caso do LF, esta substituição exerceu uma pequena diminuição na resistência à compressão de 4% em relação às amostras sem CV. Para o PG, esta diminuição representou um impacto ainda menor, apenas 2% inferior.

O ensaio de **retração** indicou que o efeito isolado da variável teor de material pigmentante apresenta pouca influência sobre esta variável de resposta. Apesar de ser considerada estatisticamente significativa nos dois grupos, de maneira geral, a utilização de LF e PG representou um aumento na variação dimensional de apenas 2% e 6%, respectivamente, em relação às amostras que não continham cor.

Ao se considerar o efeito isolado da incorporação de CV observa-se uma redução nos valores de retração, principalmente para o grupo do LF que, de forma geral, apresentou resultado 23% inferior do que aquele com teor de CV de 0%. Entretanto, esta intensidade de comportamento não foi observada para o PG, que obteve resultados de variação dimensional apenas 4% menor.

Com relação à **resistência à tração na flexão**, o grupo LF apresentou uma diminuição estatisticamente significativa quanto à utilização de material pigmentante, em torno de 13%. Entretanto, para o grupo de PG este fator isolado não foi considerado significativo.

Visto que, de uma maneira geral, em relação à resistência à tração, a melhora nos resultados com utilização de CV é relativamente pequena, este fator isolado não foi considerado estatisticamente significativo em nenhum dos dois grupos de estudo.

A substituição de agregado natural por LF ou PG apresentou um efeito significativo sobre **a taxa de absorção de água por capilaridade**. Entretanto, analisando-se tecnicamente estes resultados, de uma forma geral, não se observam variações nos valores em relação às amostras sem material pigmentante. Os resultados obtidos para os dois grupos mantiveram-se numa mesma faixa de valores, ou seja, entre 0,10 e 0,12 g/cm².h^{1/2}.

Conforme o esperado, o aumento no teor de pigmento influencia as **características colorimétricas** finais do material. Quanto ao parâmetro L*, nota-se que à medida que aumenta o teor de pigmento mais escura fica a superfície da amostra, apresentando valores mais próximos de zero. Porém, o PG, por apresentar maior poder de coloração, resultou em amostras de luminosidade 15% mais escuras que o LF.

Apesar de ser estatisticamente significativa, de forma satisfatória, a incorporação de CV representou pouca influência na luminosidade das amostras, diminuindo seus valores em 4% e 2% para os LF e PG, respectivamente.

Através do controle cromático dos parâmetros L*a*b*, verificou-se uma diferença significativa sobre a variação colorimétrica ΔE para os dois tipos de pigmentos testados, considerando-se o efeito isolado do teor de material pigmentante. Em geral, o aumento no teor de pigmento representou um aumento na variável ΔE , apresentando resultados superiores próximos a 30% e 36% para o LF e PG, respectivamente, quando comparados às amostras sem cor, que demonstraram ser cromaticamente mais estáveis.

Ao contrário do observado para o parâmetro L*, o aumento no teor de CV indicou um aumento nos resultados da variação de cor ΔE . Para o LF e o PG, este acréscimo foi de 42% e 54%, respectivamente.

A incorporação de resíduos como pigmentos abre novos campos de aplicações uma vez que acrescenta alternativas diferentes para projetos arquitetônicos em termos de cores. A abordagem em argamassa conduz a uma de misturas que pode incluir diferentes tipos

de cimentos, pigmentos e adições minerais possibilitando verificar o efeito de pigmentos em diferentes propriedades ao longo do tempo.

Com o objetivo de verificar a viabilidade do uso de lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco e cinza volante, através da análise dos resultados obtidos nesta pesquisa observam-se indícios da possibilidade de reutilização do LF como pigmento, constituindo uma alternativa de valorização do resíduo e contribuição para a minimização da degradação ambiental.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sendo a utilização de resíduos como pigmentos uma tecnologia recentemente nova, no desenvolvimento do trabalho surgiram assuntos que necessita de estudo mas, devido as limitações do programa experimental não puderam se abrangidos. Sendo assim, as derivações mais pertinentes envolveriam as seguintes questões:

- Verificação do comportamento do lodo de fosfatização como pigmento em concretos moldados com cimento Portland branco;
- Verificação do comportamento e uso do lodo de fosfatização em matriz cimentícia para rejunte cerâmico;
- Verificação de aspectos relacionados à estética em relação à manchamentos da superfície do material por depósitos cristalinos através de ciclos de molhagem e secagem;
- Realização de um estudo mais aprofundado sobre as interações químicas e físicas que ocorrem entre o cimento Portland branco, a cinza volante e o lodo de fosfatização;
- Análise da perda de cor através da aplicação de histogramas de cor em imagens digitais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C979/2010**: Standard Specification for pigments for integrally colored concrete. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618/2012**: Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Pennsylvania, 2012

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215: 1997**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248: 2003**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52: 2009**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: 2006**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739: 2007**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15261: 2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13279: 2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733: 1991**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ABITANTE, A. L. R. **Estimativa da vida útil de placas cerâmicas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados**. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

AGUIAR, C. A. **Concreto de cimento Portland branco estrutural_ análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 327–363, 2010.

ALTAFIN, V. L.; POLONIO, W.; MEDEIROS, G. A.; BRANDÃO, M. F.; ZUIN, F. D.; BUSCARATTO, E. A.; MENEZES, M. O. Utilização de lodo de fosfatização na produção de mudas de espécies nativas. **Engenharia Ambiental**, v. 1, p. 45–50, 2004.

ATIŞ, C. D.; KILIÇ, A. e SEVİM, U. K. Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 99–102, 2004.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade do Minho. - [S.l.]. 2002.

BAENA, O. J. R.; JIMÉNEZ, C. F. V. e RÚA, M. O. B. Influencia oh pH in the properties of synthetic goethite as a pigment. **Dyna**, v. 3, p. 163–170, 2008.

BARATA, M. S. e ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. **Cerâmica**, v. 58, p. 36–42, 2012.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1v. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185–232.

BATTAGIN, A. F. e BATTAGIN, I. L. S. O Cimento Portland no Brasil. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 762–790.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Hormigones de alta prestación elaborados com cemento gris y cemento blanco. Instituto de tecnologia Industrial. Centro de Investigación y Desarrollo em Construcciones. 2002.

BERSCH, R. A. **Avaliação da ação da fluorescência em cerâmica vermelha com adição de lodo de fosfatização**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civi. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo.l - [S.l.]. 2011.

BONDIOLI, F.; MANFREDINI, T. e OLIVEIRA, A. P. N. Pigmentos Inorgânicos : Projeto, produção e aplicação industrial. **Cerâmica Industrial**, v. 3, p. 13–17, 1998.

BOSS, A.; KNISS, C. T.; AGUIAR, B. M.; PRATES, P. B.; MILANEZ, K.. Obtenção de pigmentos cerâmicos a partir de resíduo de galvanoplastia. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. **Anais...** Porto de Galinhas/PE: [s.n.], 2011.

BREHM, F. A.; MACHADO, J. G. M. S.; MORAES, C. A. M.; SANTOS, C. A.; VILELA, A. C. F.; CUNHA, J. B. M. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the eletric arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, p. 953–960, 2006.

BREHM, F. A.; BERSCH, R. A.; KULAKOWSKI, M. P.; MORAES, C. A. M.; ROXO, K.; RODRIGUES, V.; PAMPANELLI, A. Adição de lodo de fosfatização para produção de

concreto - escala laboratorial. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Fortaleza: [s.n.], 2008.

BREHM, F. A.; BERSCH, R. A.; COLLATTO, D.; MORAES, C. A. M.; RODRIGUES, V.; ROXO, K.. Produção de blocos cerâmicos com adição de lodo de fosfatização como matéria-prima - escala laboratorial. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Fortaleza: [s.n.], 2008.

BREHM, F.A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 15–27, 2013.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1651–1687.

CAPONERO, J. e TENÓRIO, J. A. S. Laboratory testing of the use of phosphate-coating sludge in cement clinker. v. 29, p. 169–179, 2000.

CARVALHO e CALAVEIRA. Estabilidade colorimétrica e influência da incorporação de pigmentos em concretos submetidos a diferentes estados de exposição ambiental. In: 44° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

CASTRO, A. L. e PANDOLFELLI, V. C. Revisão : Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S. e SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1087–1092, 2004.

CIB. Producción de hormigones de color uniforme y sin defectos de superficie. **Informe N° 5**, 1982.

CICHINELE, G. C. Centro das Artes. **Revista Téchne**, 2012.

COELHO, F. C. A. **Variación del color y textura superficial de hormigones vistos, con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental**. Tese (Doutorado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, Espanha. - [S.l.]. 2000.

COELHO, F. C. A. Estabilidad colorimétrica e influencia de la adición de pigmentos inorgánicos en hormigones sometidos a distintos estados de exposición ambiental. **Revista de la Construcción**, v. 1, 2002.

CORINALDESI, V.; MONOSI, S. e RUELLO, M. L. Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 289–293, 2012.

COSTA, M. G. C. **Valorização de resíduos industriais na formulação de produtos e pigmentos cerâmicos: processamento e desenvolvimento de cor.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. Portugal. - [S.l.]. 2009.

DAL MOLIN, D. C. Adições minerais para concreto estrutural. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345–379.

DELLINGHAUSEN, L. D. M.; ISAIA, G. C. e VEIGA, K. K. Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 49–65, 2009.

DUNNOUS, J. Concrete block coloring with iron oxide pigment suspension. p. 83–91, 1997.

FEAM, F. E. do M. A. Inventário de Resíduos Sólidos Industriais: Ano Base 2012. 2013.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. e PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259–2265, 2003.

FILHO, O. M. e NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens.** Rio de Janeiro: Brasport, 1999. p. 331

FONSECA, A. A. e NUNES, A. **Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural.** . In: 2ª Jornadas de Estruturas de Betão, 1998. Anais... Portugal.: [s.n.], 1998.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1489–1498, 2004.

GIFFONI, P. de O. e LANGE, L. C. A utilização de borra de fosfato como matéria prima alternativa para a fabricação de tijolos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 10, p. 128–136, 2005.

GOBBO, L. A.; CINCOTTO, M. A. e QUARCIONI, V. A. Comparison between wet chemical analysis and rietveld method quantification in white cement sampkes. 2007.

GOMES, O. F. M. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. - [S.l.]. 2001.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - [S.l.]. 2000.

GRAÇA, N. G.; BITTENCOURT, R. M. e SANTOS, S. B. Dos. Efeitos da temperatura sobre o concreto. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 687–711.

GUTIÉRREZ, J. C. R.; BAENA, O. J. R. e TOBÓN, J. I. Evaluation of white cement coloured with ultramarine blue pigment. p. 225–231, 2009.

HAJJAJI, W.; ZANELLI, C.; SEABRA, M. P.; DONDI, M.; LABRINCHA, J. A. Cr-doped perovskite and rutile pigments derived from industrial by-products. **Chemical Engineering Journal**, v. 171, n. 3, p. 1178–1184, 2011.

HAMAD, B. S. Investigations of Chemical and physical properties of white cement concret. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 95, p. 161–167, 1995.

HARTMANN, C. e BENINI, C. Concreto arquitetônico e decorativo. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. 2v. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1645–1682.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. Deformações por retração e fluência. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 655–685.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Sao Paulo. - [S.l.]. 2008.

ISAIA, G. C. e GALTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, p. 19–30, 2004.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 97–121.

KALEDOVÁ, A. e VESELÝ, D. Needle-shaped anticorrosion pigments based on the ferrites of zinc, calcium and magnesium. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 54, n. 1, p. 3–15, 2007.

KATE, G. K. e MURNAL, P. B. Effect of adition of fly ash on shrinkage characteristics in high strength concrete. n. 1, p. 11–16, 2013.

KAZMIERCZAK, C. S. Proteções superficiais de estruturas de concreto. In: 2V., 1 ED. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1211–1231.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 154 f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Concreto branco. In: 2V., 1 ed.p. 1684 – 1730. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

KORIFI, R.; LE DRÉAU, Y.; ANTINELLI, J.; VALLS, R.; DUPUY, N. CIELab color space predictive models for colorimetry devices – Analysis of perfume quality. **Talanta**, v. 104, p. 58–66, 2013.

KUPAEI, R. H.; ALENGARAM, U. J.; JUMMAT, M. Z. B.; NIKRAZ, H. Mix design for fly ash based oil palm shell geopolymers lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 490–496, 2013.

KUTCHKO, B. e KIM, a. Fly ash characterization by SEM–EDS. **Fuel**, v. 85, n. 17-18, p. 2537–2544, 2006.

LANXESS. Coloração do concreto: Instruções de processamento. p. 1–17, 2002.

LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY. **Case Study Project: Bodega Antión**. . Germany: Colored Concrete Works, 2008.

LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY. **Case Study: Project ESO Hotel**. . Germany: Colored Concrete Works, 2009.

LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY. **Case Study: Casa das Historias Paula Rego**. . Germany: Colored Concrete Works, 2011.

LEE, H.-S.; LEE, J.-Y. e YU, M.-Y. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1889–1896, 2003.

LEE, H.-S.; LEE, J.-Y. e YU, M.-Y. Influence of inorganic pigments on the fluidity of cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 703–710, 2005.

LEITE, A. L. S. P. **Síntese de pigmentos inorgânicos azuis com base em lama de anodização de alumínio**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Cerâmica e do Vidro. Universidade de Aveiro. Portugal. - [S.l.]. 2008.

LEMAIRE, G.; ESCADEILLAS, G. e RINGOT, E. Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 8, p. 604–611, 2005.

LI, Y.; BAO, J. e GUO, Y. The relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 1855–1860, 2010.

LIMA, F. S. S.; BARATA, M. S.; NEVES, R. F.; MACEDO, A. N. O uso de lama vermelha e do residuo caulinitico na produção de pigmento pozoLânico para argamassas e concretos de cimento Portland. In: ANAIS 47° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Recife: IBRACON, 2005.

LIMA, M. G. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. 1v. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 733–772.

LIN, K.-L.; LIN, D. F. e LUO, H. L. Influence of phosphate of the waste sludge on the hydration characteristics of eco-cement. **Journal of hazardous materials**, v. 168, n. 2-3, p. 1105–10, 2009.

LÓPEZ, A.; TOBES, J. M.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 754–761, 2009.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F. e SAAVEDRA. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete research**, v. 19, p. 63–68, 1989.

MARCELLO, R. R. **Caracterização e beneficiamento das cinzas de incineração de paras de couro para uso como pigmento cerâmico a base de óxido de cromo**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - [S.l.]. 2013.

MARENGONI, M. e STRINGHINI, D. Tutorial: Introdução à Visão Computacional usando OpenCV. **Revista de Informática Teórica Aplicada**, v. XVI, 2009.

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

MELCHIADES, F. G. e BOSCHI, A. O. Cores e tonalidades em revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 4, p. 11–18, 1999.

MONTEDO, O. R. K.; DELLA, V. P.; REITZ, G. M.; HOTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. Obtenção de pigmento cerâmico heteromórfico $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ a partir de carepa de aço. . Foz do Iguaçu: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

NERO, J. M. G. e NUNES, A. **Fundamentos para a prescrição e utilização de betão branco**. SECIL. Portugal: [s.n.], 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª. ed. Sao Paulo: PINI, 1997.

NORSUZAILINA, M. S. e SININ, H. Efflorescence Phenomenon on Concrete Structures. **Advanced Materials Research**, v. 626, p. 747–750, 2012.

OLIVEIRA, L. C. A.; FABRIS, J. D. e PEREIRA, M. C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. **Química Nova**, v. 36, n. 1, p. 123–130, 2013.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromacidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre. 2004.

PERENCHIO, W. The Drying Shrinkage Dilemma. **Concrete Construction**, v. 42, p. 379–383, 1997.

PIOVESAN, A. Z. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - [S.l.]. 2009.

POON, C. S.; LAM, L. e WONG, Y. L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 3, p. 447–455, 2000.

PORTER, C. B. **Fachadas de hormigón arquitectónico**. Dissertação (Mestrado). Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Portis de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. - [S.l.]. 2011.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). White cement concrete and colored concrete construction. **Concrete technology today**, v. 20, 1999.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **White Concrete : New Avenues of Safety. Concrete Information**. [S.l.]: PCA R&D Serail N. 2618, 2002.

POWERS, T. C. **Rev. Mater. Construction**. . Paris: [s.n.], 1961.

PRIM, S. R.; FOLGUERAS, M. V.; LIMA, M. A.; HOTZA, D. Synthesis and characterization of hematite pigment obtained from a steel waste industry. **Journal of hazardous materials**, v. 192, n. 3, p. 1307–13, 2011.

QUEIROZ, J. E. R. e GOMES, H. M. Introdução ao processamento digital de imagens considerações iniciais. **Revista RITA**, v. 8, p. 1–31, 2001.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com empregos de cinza volante**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - [S.l.]. 2011.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 32, p. 163 – 173, 1999.

RYU, G. S.; LEE, Y. B.; KOH, K. T.; CHUNG, Y. S. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**, v. 47, n. 2013, p. 409–418, 2013.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F. e PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SILVA, J.; GOMES, C.; GUIMAR~ES, M.; MAIA, L. Betão Autocompactável de elevado efeito estético. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTUTAL. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012.

SILVA, N. G. avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa catarina. Florianópolis, 2011.

SILVA, J. E. **Valorização de lamas galvânicas por via hidrometalúrgica**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade do Minho, Guimarães. - [S.l.]. 2006.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791–823.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, S. **Relatório anual**. . [S.l.: s.n.], 2012.

SUPIT, S. W. M.; SHAIKH, F. U. a. e SARKER, P. K. Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 278–286, 2014.

TERMKHAJORNKIT, P.; NAWA, T.; NAKAI, M.; SAITO, T. Effect of fly ash on autogenous shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 473–482, 2005.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010. - [S.l.]. 2010.

TUDORA, G. Essential characteristics of exposed concrete nowadays. **Buletinul Institutului Politehnic din Iasi**, p. 177–183, 2011.

VARGAS, A. S.; DAL MOLIN, D. C.; VILELA, A. C. F.; SILVA, F. J.; PAVÃO, B.; VEIT, H. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio , curing temperature and age on compressive strength , morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 653–660, 2011.

VÁZQUEZ-NION, D; SANMARTÍN, P.; SILVA, B.; PRIETO, B. Reliability of color measurements for monitoring pigment content in a biofilm-forming cyanobacterium. **International Biodeterioration & Biodegradation**, p. 1–7, 2013.

VERNILLI, F.; SILVA, S. .N.; VIEIRA, A. T. O.; LONGO, E. Síntese de pigmentos inorgânicos tendo como precursor a solução ácida remanecente da decapagem de chapas de aço. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS. **Anais...** Guimarães, Portugal: [s.n.], 2014.

WILLS, M. H. **An Investigation of Fastness of Concrete Colors**. . Los Angeles: Davis Colors, [S.d.].

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, - [S.l.]. 2010.

APÊNDICES

Tabela A1 – Características das argamassas moldadas.

Traço	CV	LF	PG	Data da moldagem	Temperatura (°C)	Umidade (%)	IC (mm)
REF	0	0	0	09/09/2013	19,0	84	281
CV0_LF5	0	5	0	10/10/2013	19,8	67	278
CV0_LF10	0	10	0	18/09/2013	13,8	62	290
CV0_LF20	0	20	0	10/10/2013	22,2	61	271
CV0_PG1	0	0	1	09/09/2013	29,4	67	287
CV0_PG5	0	0	5	08/10/2013	23,5	46	271
CV10	10	0	0	11/09/2013	32,5	37	291
CV10_LF5	10	5	0	09/09/2013	29,5	55	279
CV10_LF10	10	10	0	11/09/2013	33,7	34	278
CV10_LF20	10	20	0	18/09/2013	15,0	49	274
CV10_PG1	10	0	1	10/10/2013	25,2	52	281
CV10_PG5	10	0	5	15/10/2013	27,0	57	271
CV20	20	0	0	08/10/2013	15,1	69	280
CV20_LF5	20	5	0	15/10/2013	26,6	59	271
CV20_LF10	20	10	0	15/10/2013	27,4	54	287
CV20_LF20	20	20	0	09/09/2013	26,2	67	284
CV20_PG1	20	0	1	11/09/2013	30,8	42	280
CV20_PG5	20	0	5	18/09/2013	15,9	48	274

Tabela A2- Resultados de compressão axial para todas as idades, em MPa.

Traço	CV	LF	PG	7 dias (Mpa)	Média 7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	Média 28 dias (MPa)
REF	0	0	0	46,0	44,0	51,2	52,0
				42,2		51,0	
				43,8		53,8	
CV0_LF5	0	5	0	44,0	47,0	48,3	49,1
				48,1		46,6	
				49,0		52,5	
CV0_LF10	0	10	0	46,6	44,7	44,1	44,6
				42,2		48,3	
				45,4		41,4	
CV0_LF20	0	20	0	24,2	24,7	51,6	49,9
				25,7		48,1	
				24,1		50,1	
CV0_PG1	0	0	1	46,2	41,2	56,4	52,5
				33,2		54,5	
				44,1		46,6	
CV0_PG5	0	0	5	46,9	49,0	50,2	49,5
				50,6		49,3	
				49,4		49,0	
CV10	10	0	0	40,3	41,5	45,5	53,1
				43,4		57,4	
				40,8		56,3	
CV10_LF5	10	5	0	38,4	38,8	40,4	44,8
				39,8		53,4	
				38,1		40,5	
CV10_LF10	10	10	0	44,4	44,1	53,1	53,2
				41,7		55,4	
				46,1		51,0	
CV10_LF20	10	20	0	44,0	43,7	39,1	42,8
				43,6		40,9	
				43,5		48,4	
CV10_PG1	10	0	1	42,4	43,0	51,0	45,5
				42,9		37,9	
				43,8		47,6	
CV10_PG5	10	0	5	37,7	36,2	49,0	48,0
				32,5		49,5	
				38,3		45,6	
CV20	20	0	0	43,3	43,2	54,0	55,1
				43,9		54,9	
				42,4		56,4	
CV20_LF5	20	5	0	30,2	31,5	46,6	45,5
				31,1		46,6	
				33,2		43,3	
CV20_LF10	20	10	0	39,9	37,2	42,9	43,2
				35,7		46,8	
				36,1		40,0	
CV20_LF20	20	20	0	32,5	32,8	38,4	39,2
				31,0		41,2	
				34,9		37,9	
CV20_PG1	20	0	1	43,5	43,6	54,1	50,6
				45,5		46,6	
				41,7		51,1	
CV20_PG5	20	0	5	38,4	37,9	47,3	47,5
				36,9		47,8	
				38,5		47,3	

Tabela A3- Resultados do ensaio de retração para todas as idades.

Traço	CV (%)	Idade (dias)	Massa (g)	Δm	Retração (mm/m)	ΔE
REF	0	1	406,77	-	5,486	-
		1	411,28	-	5,412	-
		1	407,06	-	6,060	-
		7	402,26	-1,11	5,406	-0,32
		7	406,58	-1,14	5,333	-0,32
		7	401,23	-1,43	5,971	-0,36
		14	400,41	-1,56	5,380	-0,42
		14	404,73	-1,59	5,307	-0,42
		14	399,63	-1,83	5,947	-0,45
		21	399,86	-1,70	5,364	-0,49
		21	404,13	-1,74	5,291	-0,48
		21	399,16	-1,94	5,932	-0,51
		28	399,58	-1,77	5,354	-0,53
		28	403,80	-1,82	5,280	-0,53
		28	398,88	-2,01	5,922	-0,55
		42	399,29	-1,84	5,347	-0,56
		42	403,48	-1,90	5,274	-0,55
42	398,63	-2,07	5,917	-0,57		
CV0_LF5	0	1	413,08	-	5,338	-
		1	412,45	-	5,499	-
		1	413,91	-	5,032	-
		7	407,00	-1,47	5,241	-0,39
		7	406,41	-1,46	5,400	-0,40
		7	409,54	-1,06	4,929	-0,41
		14	406,02	-1,71	5,226	-0,45
		14	405,42	-1,70	5,388	-0,44
		14	406,51	-1,79	4,913	-0,48
		21	405,01	-1,95	5,195	-0,57
		21	404,38	-1,96	5,356	-0,57
		21	405,39	-2,06	4,880	-0,61
		28	404,36	-2,11	5,186	-0,61
		28	403,75	-2,11	5,347	-0,61
		28	404,75	-2,21	4,874	-0,63
		42	403,31	-2,37	5,196	-0,57
		42	403,71	-2,12	5,356	-0,57
42	404,74	-2,22	4,881	-0,60		
CV0_LF10	0	1	402,53	-	6,463	-
		1	409,19	-	6,342	-
		1	403,03	-	5,891	-
		7	393,51	-2,24	6,359	-0,42
		7	399,77	-2,30	6,235	-0,43
		7	394,31	-2,16	5,786	-0,42
		14	392,56	-2,48	6,322	-0,56
		14	398,87	-2,52	6,197	-0,58
		14	393,46	-2,37	5,748	-0,57
		21	392,14	-2,58	6,316	-0,59
		21	398,33	-2,65	6,190	-0,61
		21	393,10	-2,46	5,742	-0,60
		28	392,24	-2,56	6,320	-0,57
		28	398,43	-2,63	6,196	-0,58
		28	393,16	-2,45	5,747	-0,58
		42	391,93	-2,63	6,307	-0,62
		42	398,16	-2,70	6,182	-0,64
42	392,93	-2,51	5,734	-0,63		
CV0_LF20	0	1	399,18	-	6,902	-
		1	395,91	-	6,698	-
		1	413,73	-	6,623	-
		7	387,03	-3,04	6,771	-0,52
		7	383,17	-3,22	6,564	-0,54
		7	400,46	-3,21	6,484	-0,56
		14	385,00	-3,55	6,752	-0,60
		14	382,10	-3,49	6,544	-0,62
		14	399,32	-3,48	6,474	-0,60
		21	385,39	-3,45	6,722	-0,71

		21	381,46	-3,65	6,515	-0,73
		21	398,71	-3,63	6,435	-0,75
		28	385,05	-3,54	6,720	-0,73
		28	381,05	-3,75	6,514	-0,74
		28	398,29	-3,73	6,433	-0,76
		42	386,89	-3,08	6,740	-0,65
		42	382,90	-3,29	6,534	-0,66
		42	400,25	-3,26	6,453	-0,68
		1	416,17	-	6,663	-
		1	422,82	-	6,260	-
		1	417,95	-	6,799	-
		7	411,11	-1,22	6,581	-0,33
		7	418,18	-1,10	6,177	-0,33
		7	411,95	-1,40	6,710	-0,36
		14	409,37	-1,63	6,555	-0,43
		14	416,11	-1,59	6,150	-0,44
CV0_PG1	0	14	410,46	-1,79	6,687	-0,45
		21	408,93	-1,74	6,533	-0,52
		21	415,53	-1,72	6,127	-0,53
		21	409,96	-1,91	6,667	-0,53
		28	408,64	-1,81	6,525	-0,55
		28	415,22	-1,80	6,118	-0,57
		28	409,58	-2,00	6,658	-0,56
		42	408,29	-1,89	6,521	-0,57
		42	414,88	-1,88	6,114	-0,58
		42	409,35	-2,06	6,654	-0,58
		1	431,21	-	6,767	-
		1	430,77	-	7,552	-
		1	435,94	-	7,554	-
		7	426,78	-1,03	6,694	-0,29
		7	426,22	-1,06	7,480	-0,29
		7	431,03	-1,13	7,480	-0,30
		14	425,21	-1,39	6,655	-0,45
		14	424,59	-1,43	7,443	-0,44
CV0_PG5	0	14	429,36	-1,51	7,438	-0,46
		21	424,38	-1,58	6,633	-0,54
		21	423,79	-1,62	7,419	-0,53
		21	428,43	-1,72	7,418	-0,54
		28	423,92	-1,69	6,627	-0,56
		28	423,41	-1,71	7,411	-0,56
		28	428,05	-1,81	7,409	-0,58
		42	423,31	-1,83	6,621	-0,58
		42	422,78	-1,85	7,410	-0,57
		42	427,37	-1,97	7,405	-0,60
		1	410,80	-	6,232	-
		1	407,44	-	5,912	-
		1	411,60	-	6,175	-
		7	404,51	-1,53	6,159	-0,29
		7	401,15	-1,54	5,844	-0,27
		7	404,78	-1,66	6,099	-0,30
		14	403,77	-1,71	6,162	-0,28
		14	400,42	-1,72	5,840	-0,29
CV10	10	14	403,96	-1,86	6,095	-0,32
		21	403,40	-1,80	6,118	-0,46
		21	400,02	-1,82	5,802	-0,44
		21	403,59	-1,95	6,056	-0,48
		28	403,06	-1,88	6,136	-0,38
		28	399,70	-1,90	5,820	-0,37
		28	403,31	-2,01	6,074	-0,40
		42	402,96	-1,91	6,138	-0,38
		42	399,64	-1,91	5,824	-0,35
		42	403,27	-2,02	6,076	-0,40
		1	407,62	-	4,171	-
CV10_LF5	10	1	406,23	-	7,466	-
		1	409,50	-	6,826	-
		7	401,34	-1,54	4,080	-0,36
		7	400,74	-1,35	7,382	-0,34

		7	402,38	-1,74	6,737	-0,36
		14	399,49	-1,99	4,061	-0,44
		14	398,68	-1,86	7,359	-0,43
		14	400,75	-2,14	6,718	-0,43
		21	399,06	-2,10	4,044	-0,51
		21	398,08	-2,01	7,342	-0,50
		21	400,39	-2,22	6,701	-0,50
		28	398,73	-2,18	4,031	-0,56
		28	397,77	-2,08	7,329	-0,55
		28	400,14	-2,29	6,692	-0,54
		42	398,58	-2,22	4,029	-0,57
		42	397,52	-2,14	7,327	-0,56
		42	399,99	-2,32	6,688	-0,55
		1	398,49	-	5,949	-
		1	395,71	-	6,133	-
		1	401,26	-	6,275	-
		7	391,44	-1,77	5,879	-0,28
		7	388,23	-1,89	6,058	-0,30
		7	392,97	-2,07	6,192	-0,33
		14	391,00	-1,88	5,878	-0,28
		14	387,69	-2,03	6,056	-0,31
CV10_LF10	10	14	392,44	-2,20	6,191	-0,34
		21	390,73	-1,95	5,848	-0,40
		21	387,45	-2,09	6,026	-0,43
		21	392,16	-2,27	6,167	-0,43
		28	390,63	-1,97	5,864	-0,34
		28	387,25	-2,14	6,040	-0,37
		28	391,95	-2,32	6,175	-0,40
		42	390,85	-1,92	5,871	-0,34
		42	387,43	-2,09	6,047	-0,34
		42	392,16	-2,27	6,181	-0,38
		1	394,12	-	4,996	-
		1	390,45	-	6,115	-
		1		-		-
		7	393,11	-0,26	4,977	-0,08
		7	389,51	-0,24	6,093	-0,09
		7				
		14	392,61	-0,38	4,937	-0,24
		14	389,03	-0,36	6,053	-0,25
CV10_LF20	10	14				
		21	392,34	-0,45	4,938	-0,23
		21	388,79	-0,43	6,053	-0,25
		21				
		28	392,70	-0,36	4,942	-0,22
		28	389,16	-0,33	6,057	-0,23
		28				
		42	392,55	-0,40	4,928	-0,27
		42	389,05	-0,36	6,043	-0,29
		42				
		1	414,82	-	5,988	-
		1	417,91	-	6,181	-
		1	420,24	-	5,729	-
		7	407,60	-1,74	5,890	-0,39
		7	410,86	-1,69	6,080	-0,40
		7	414,05	-1,47	5,642	-0,35
		14	406,73	-1,95	5,878	-0,44
		14	409,84	-1,93	6,066	-0,46
CV10_PG1	10	14	413,17	-1,68	5,630	-0,40
		21	405,60	-2,22	5,844	-0,58
		21	408,67	-2,21	6,031	-0,60
		21	412,18	-1,92	5,597	-0,53
		28	404,93	-2,38	5,834	-0,62
		28	408,00	-2,37	6,022	-0,64
		28	411,54	-2,07	5,584	-0,58
		42	404,91	-2,39	5,845	-0,57
		42	407,97	-2,38	6,030	-0,60
		42	411,56	-2,07	5,598	-0,52

CV10_PG5	10	1	419,92	-	4,786	-
		1	425,50	-	5,448	-
		1	421,66	-	7,293	-
		7	414,72	-1,24	4,701	-0,34
		7	420,06	-1,28	5,361	-0,35
		7	416,53	-1,22	7,206	-0,35
		14	412,74	-1,71	4,659	-0,51
		14	417,87	-1,79	5,321	-0,51
		14	414,51	-1,70	7,165	-0,51
		21	412,05	-1,87	4,650	-0,54
		21	417,19	-1,90	5,310	-0,55
		21	413,78	-1,87	7,158	-0,54
		28	411,73	-1,95	4,661	-0,50
		28	416,90	-2,02	5,320	-0,51
		28	413,51	-1,93	7,169	-0,50
42	411,13	-2,09	4,639	-0,59		
42	416,38	-2,14	5,296	-0,61		
42	412,96	-2,06	7,144	-0,60		
CV20	20	1	404,27	-	6,086	-
		1	402,22	-	5,335	-
		1	403,31	-	5,564	-
		7	398,45	-1,44	6,000	-0,34
		7	396,31	-1,47	5,243	-0,37
		7	396,77	-1,62	5,473	-0,36
		14	396,95	-1,81	5,969	-0,47
		14	394,74	-1,86	5,212	-0,49
		14	395,22	-2,01	5,442	-0,49
		21	396,20	-2,00	5,952	-0,54
		21	393,95	-2,06	5,193	-0,57
		21	394,48	-2,19	5,426	-0,55
		28	395,84	-2,09	5,945	-0,56
		28	393,64	-2,13	5,189	-0,58
		28	394,15	-2,27	5,418	-0,58
42	395,31	-2,22	5,943	-0,57		
42	393,12	-2,26	5,188	-0,59		
42	393,61	-2,41	5,419	-0,58		
CV20_LF5	20	1	412,07	-	5,400	-
		1	408,77	-	5,758	-
		1	416,81	-	5,940	-
		7	406,61	-1,33	5,324	-0,30
		7	403,16	-1,37	5,682	-0,30
		7	410,82	-1,44	5,858	-0,33
		14	404,77	-1,77	5,290	-0,44
		14	401,18	-1,86	5,645	-0,45
		14	408,78	-1,93	5,822	-0,47
		21	404,20	-1,91	5,283	-0,47
		21	400,61	-2,00	5,640	-0,47
		21	408,19	-2,07	5,816	-0,50
		28	403,98	-1,96	5,291	-0,44
		28	400,47	-2,03	5,648	-0,44
		28	407,97	-2,12	5,825	-0,46
42	403,56	-2,07	5,274	-0,50		
42	400,01	-2,14	5,631	-0,51		
42	407,62	-2,20	5,806	-0,54		
CV20_LF10	20	1	401,50	-	4,725	-
		1	406,59	-	5,597	-
		1	409,11	-	6,001	-
		7	393,41	-2,01	4,643	-0,33
		7	399,18	-1,82	5,515	-0,33
		7	401,16	-1,94	5,916	-0,34
		14	391,76	-2,43	4,612	-0,45
		14	397,42	-2,26	5,478	-0,48
		14	399,24	-2,41	5,883	-0,47
		21	391,33	-2,53	4,606	-0,48
		21	396,96	-2,37	5,475	-0,49
		21	398,75	-2,53	5,876	-0,50
		28	391,28	-2,55	4,615	-0,44

		28	396,85	-2,40	5,483	-0,46
		28	398,61	-2,57	5,882	-0,48
		42	390,84	-2,66	4,598	-0,51
		42	396,54	-2,47	5,463	-0,54
		42	398,29	-2,64	5,867	-0,54
		1	396,68	-	6,447	-
		1	401,16	-	4,231	-
		1	398,80	-	4,273	-
		7	387,23	-2,38	6,359	-0,35
		7	390,08	-2,76	4,141	-0,36
		7	389,45	-2,34	4,180	-0,37
		14	385,48	-2,82	6,343	-0,42
		14	388,82	-3,08	4,129	-0,41
		14	387,61	-2,81	4,165	-0,43
CV20_LF20	20	21	377,07	-4,94	6,325	-0,49
		21	388,79	-3,08	4,111	-0,48
		21	387,49	-2,84	4,147	-0,50
		28	385,15	-2,91	6,317	-0,52
		28	388,67	-3,11	4,103	-0,51
		28	387,30	-2,88	4,136	-0,55
		42	385,32	-2,86	6,314	-0,53
		42	388,94	-3,05	4,102	-0,52
		42	387,42	-2,85	4,137	-0,54
		1	409,45	-	6,511	-
		1	413,46	-	4,992	-
		1	405,82	-	5,879	-
		7	401,79	-1,87	6,432	-0,32
		7	405,50	1,93	4,920	-0,29
		7	398,25	-1,87	5,800	-0,32
		14	400,96	-2,07	6,423	-0,35
		14	404,59	-2,15	4,910	-0,33
CV20_PG1	20	14	397,47	-2,06	5,791	-0,35
		21	400,52	-2,18	6,387	-0,50
		21	404,59	-2,15	4,874	-0,47
		21	397,16	-2,13	5,756	-0,49
		28	400,29	-2,24	6,404	-0,43
		28	403,91	-2,31	4,892	-0,40
		28	396,86	-2,21	5,773	-0,42
		42	400,34	-2,22	6,410	-0,40
		42	403,93	-2,30	4,897	-0,38
		42	396,95	-2,19	5,778	-0,40
		1	412,80	-	5,292	-
		1	415,48	-	6,274	-
		1	412,05	-	5,850	-
		7	402,89	-2,40	5,196	-0,38
		7	405,50	-2,40	6,178	-0,38
		7	402,38	-2,35	5,756	-0,38
		14	401,86	-2,65	5,138	-0,62
		14	404,45	-2,65	6,121	-0,61
CV20_PG5	20	14	404,45	-1,84	5,699	-0,60
		21	401,50	-2,74	5,152	-0,56
		21	404,08	-2,74	6,137	-0,55
		21	401,03	-2,67	5,714	-0,54
		28	401,53	-2,73	5,159	-0,53
		28	404,09	-2,74	6,142	-0,53
		28	401,08	-2,66	5,719	-0,52
		42	401,30	-2,79	5,145	-0,59
		42	403,81	-2,81	6,128	-0,58
		42	400,78	-2,74	5,706	-0,58

Tabela A4 - Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade, em MPa.

Traço	CV (%)	LF (%)	PG (%)	28 dias (Mpa)	Média 28 dias (MPa)
REF	0	0	0	28,2	28,0
				28,8	
				26,9	
CV0_LF5	0	5	0	29,8	27,9
				28,3	
				25,5	
CV0_LF10	0	10	0	28,4	27,7
				28,2	
				26,5	
CV0_LF20	0	20	0	24,2	25,9
				27,6	
				25,8	
CV0_PG1	0	0	1	24,2	25,8
				24,6	
				28,6	
CV0_PG5	0	0	5	33,1	31,8
				34,3	
				28,1	
CV10	10	0	0	30,9	30,5
				28,6	
				32,1	
CV10_LF5	10	5	0	21,2	21,2
				17,5	
				25,0	
CV10_LF10	10	10	0	26,9	27,8
				28,6	
				27,8	
CV10_LF20	10	20	0	27,3	26,1
				25,6	
				25,5	
CV10_PG1	10	0	1	26,2	28,6
				30,7	
				29,0	
CV10_PG5	10	0	5	31,8	31,9
				34,4	
				29,4	
CV20	20	0	0	29,7	30,0
				32,1	
				28,1	
CV20_LF5	20	5	0	33,9	30,8
				26,9	
				31,6	
CV20_LF10	20	10	0	31,4	27,2
				25,4	
				24,7	
CV20_LF20	20	20	0	20,4	20,9
				20,8	
				21,4	
CV20_PG1	20	0	1	32,6	31,4
				32,3	
				29,2	
CV20_PG5	20	0	5	30,2	29,6
				30,6	
				27,9	

Tabela A5 - Resultados de taxa de absorção capilar aos 28 dias de idade, em MPa.

Traço	CV (%)	LF (%)	PG (%)	S (g/cm ² .h ^{1/2})	S média (g/cm ² .h ^{1/2})
REF	0	0	0	0,139	0,129
	0	0	0	0,135	
	0	0	0	0,118	
	0	0	0	0,122	
CV0_LF5	0	5	0	0,110	0,116
	0	5	0	0,115	
	0	5	0	0,119	
	0	5	0	0,119	
CV0_LF10	0	10	0	0,101	0,100
	0	10	0	0,096	
	0	10	0	0,103	
	0	10	0	0,099	
CV0_LF20	0	20	0	0,108	0,108
	0	20	0	0,108	
	0	20	0	0,109	
	0	20	0	0,105	
CV0_PG1	0	0	1	0,124	0,118
	0	0	1	0,110	
	0	0	1	0,114	
	0	0	1	0,123	
CV0_PG5	0	5	5	0,107	0,105
	0	5	5	0,106	
	0	5	5	0,102	
	0	5	5	0,103	
CV10	20	10	0	0,111	0,109
	20	10	0	0,109	
	20	10	0	0,106	
	20	10	0	0,110	
CV10_LF5	20	20	0	0,128	0,129
	20	20	0	0,133	
	20	20	0	0,130	
	20	20	0	0,125	
CV10_LF10	20	0	0	0,129	0,124
	20	0	0	0,121	
	20	0	0	0,125	
	20	0	0	0,122	
CV10_LF20	20	5	0	0,104	0,101
	20	5	0	0,099	
	20	5	0	0,101	
	20	5	0	0,101	
CV10_PG1	20	10	1	0,105	0,108
	20	10	1	0,107	
	20	10	1	0,110	
	20	10	1	0,111	
CV10_PG5	20	20	5	0,096	0,103
	20	20	5	0,105	
	20	20	5	0,105	
	20	20	5	0,107	
CV20	20	10	0	0,075	0,083
	20	10	0	0,087	
	20	10	0	0,085	

	20	10	0	0,084	
	20	20	0	0,094	
CV20_LF5	20	20	0	0,097	
	20	20	0	0,094	0,094
	20	20	0	0,091	
	20	0	0	0,099	
CV20_LF10	20	0	0	0,104	
	20	0	0	0,094	0,098
	20	0	0	0,095	
	20	5	0	0,104	
CV20_LF20	20	5	0	0,103	
	20	5	0	0,105	0,103
	20	5	0	0,100	
	20	10	1	0,115	
CV20_PG1	20	10	1	0,109	
	20	10	1	0,107	0,110
	20	10	1	0,111	
	20	20	5	0,095	
CV20_PG5	20	20	5	0,089	
	20	20	5	0,099	0,093
	20	20	5	0,089	

Tabela A6 - Resultados obtidos na análise da cor, através de espectrofotômetro.

Traço	CV (%)	LF (%)	PG (%)	Tipo exp.	1 dia			7 dias			63 dias			126 dias					
					L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
REF	0	0	0	T	82,42	-0,03	7,55	82,61	0,02	7,84	0,35	82,50	0,07	8,17	0,64	82,14	0,14	8,28	0,80
				T	81,55	0,13	7,38	81,05	0,29	7,32	0,53	81,18	0,35	7,42	0,43	81,84	0,16	7,16	0,36
				N	80,96	0,12	7,66	79,41	0,67	8,63	1,83	81,10	1,24	7,29	1,21	80,75	1,48	7,52	1,37
				N	81,15	0,03	6,56	79,19	1,08	8,34	2,87	80,43	1,36	7,21	1,69	80,48	1,44	7,22	1,74
CV5_LF0	0	5	0	T	76,80	2,41	12,15	77,89	2,36	12,03	1,11	79,04	2,07	10,99	2,54	79,19	2,12	10,96	2,69
				T	75,47	2,35	11,76	78,58	2,12	11,29	3,16	78,26	2,31	11,97	2,80	79,45	1,95	10,25	4,27
				N	76,31	2,52	12,87	77,11	2,79	12,53	0,91	77,96	2,94	11,33	2,30	78,92	2,92	11,87	2,83
				N	75,80	2,71	13,19	76,13	3,05	12,88	0,57	77,89	3,01	11,62	2,63	76,81	3,48	12,81	1,33
CV0_LF10	0	10	0	T	69,66	4,87	17,20	72,47	4,56	16,52	2,91	72,64	4,43	16,02	3,23	73,41	4,23	15,36	4,23
				T	69,77	4,64	16,26	73,94	3,95	14,84	4,46	74,65	3,68	14,26	5,37	75,92	3,57	13,82	6,70
				N	70,29	4,80	17,13	74,28	4,43	14,84	4,61	76,77	4,19	13,22	7,59	76,34	4,48	13,87	6,89
				N	70,59	4,63	16,09	74,28	4,45	13,97	4,26	76,08	4,13	13,25	6,20	76,07	4,16	13,08	6,27
CV0_LF20	0	20	0	T	65,90	7,04	21,51	68,63	6,56	20,71	2,88	69,45	6,40	20,44	3,75	69,78	6,24	20,05	4,21
				T	65,06	7,46	22,52	67,44	6,68	20,58	3,17	68,20	7,19	22,08	3,18	69,16	6,73	21,08	4,40
				N	66,70	6,84	21,63	68,21	6,52	20,36	2,00	68,16	6,57	19,36	2,71	69,63	6,71	20,21	3,26
				N	65,71	6,57	20,10	67,93	6,60	19,69	2,26	68,07	6,58	18,82	2,69	68,51	6,49	18,20	3,38
CV0_PG1	0	1	1	T	65,59	17,61	24,33	65,62	17,68	24,16	0,19	65,46	18,01	24,27	0,43	64,62	17,86	23,82	1,13
				T	64,54	17,46	23,93	64,73	17,65	23,85	0,28	65,51	17,39	23,60	1,03	66,23	17,10	22,88	2,02
				N	64,49	17,74	24,54	65,08	16,68	22,48	2,38	69,49	13,45	16,83	10,14	69,44	14,31	18,30	8,32
				N	63,46	17,75	24,26	66,35	16,68	22,18	3,72	69,95	13,99	18,19	9,66	69,24	14,09	18,24	9,11
CV0_PG5	0	5	5	T	53,51	26,23	31,20	53,95	25,87	30,49	0,90	54,55	25,52	29,88	1,83	54,47	25,49	29,49	2,10
				T	51,16	26,14	31,09	53,11	24,69	29,49	2,91	53,20	24,78	29,51	2,91	53,43	24,80	29,20	3,25
				N	54,53	24,99	29,69	54,54	24,75	28,22	1,48	54,98	24,18	26,41	3,40	55,63	23,10	25,29	4,91
				N	54,14	25,06	29,20	54,18	24,62	27,35	1,91	55,45	23,67	25,81	3,89	55,47	20,02	25,02	4,83
CV10	10	0	0	T	78,37	0,23	6,47	78,41	0,46	7,25	1,31	82,19	0,52	6,14	3,84	82,80	0,40	5,92	4,46
				T	74,56	0,15	7,00	79,19	0,05	6,84	4,61	81,01	-0,01	5,65	6,59	81,31	0,03	5,62	6,90
				N	75,98	0,14	6,39	81,22	0,50	6,49	5,26	82,47	0,66	6,29	6,51	82,63	0,77	6,01	6,69
				N	76,77	0,17	6,72	81,81	0,37	6,21	5,08	81,72	0,87	6,03	5,05	83,42	0,70	5,77	6,74
CV10_LF5	10	5	0	T	72,71	2,71	12,84	73,67	2,65	13,35	1,09	75,16	2,40	12,27	2,54	75,60	2,32	11,50	3,21
				T	72,60	2,81	13,71	74,24	3,03	13,80	1,66	74,49	3,09	14,03	1,94	75,51	2,93	13,71	2,91
				N	72,63	2,69	13,06	76,32	2,62	12,83	3,70	78,60	2,70	11,07	6,29	78,41	2,61	10,72	6,24
				N	71,99	2,79	13,05	76,78	2,52	12,36	4,85	78,12	2,89	12,17	6,19	79,09	2,65	11,38	7,30
CV10_LF10	10 0	10	0	T	71,68	4,12	16,16	71,67	4,37	16,78	0,70	71,68	4,43	16,86	1,16	72,89	4,40	16,44	1,08
				T	70,58	4,61	17,23	70,66	4,69	17,49	0,28	72,52	4,38	16,63	0,83	71,88	4,42	16,76	1,39
				N	69,44	4,43	16,57	71,44	4,80	17,68	2,31	75,65	3,86	13,49	6,95	75,91	4,02	14,37	6,84

				N	70,53	4,47	17,17	69,12	5,17	18,16	1,87	74,57	3,70	11,11	7,32	73,17	4,30	13,94	4,17
CV10_LF20	10	20	0	T	61,62	8,25	24,11	69,24	6,19	19,93	8,94	65,78	17,02	23,44	3,75	69,01	6,43	20,08	8,63
				T	63,27	7,99	24,03	68,31	6,63	21,06	6,01	66,08	16,96	23,57	3,02	68,21	6,53	20,70	6,14
				N	62,74	7,82	23,78	63,57	9,67	23,90	2,02	67,49	14,92	19,41	9,47	69,48	7,06	19,56	7,98
				N	62,54	7,86	23,54	65,14	7,37	20,02	4,40	67,74	14,70	18,90	7,26	69,59	6,53	18,56	8,73
				T	62,09	17,36	24,06	64,78	17,06	23,51	2,76	65,78	17,02	23,44	3,75	65,58	16,69	22,97	3,72
CV10_PG1	10	0	1	T	63,36	17,32	24,83	65,51	17,00	23,94	2,35	66,08	16,96	23,57	3,02	66,08	16,84	23,37	3,13
				N	59,81	17,97	24,02	66,74	15,01	20,27	8,42	67,49	14,92	19,41	9,47	67,70	14,64	18,74	10,06
				N	62,54	16,59	23,61	66,06	15,67	21,77	4,07	67,74	14,70	18,90	7,26	68,46	14,84	19,79	7,26
				T	51,08	25,33	30,24	52,13	24,58	28,70	2,02	52,55	24,53	28,60	2,54	53,34	24,13	28,21	3,26
CV10_PG5	10	0	5	T	53,25	24,95	30,92	54,88	24,32	29,56	2,21	55,63	23,73	28,53	3,59	55,73	23,92	28,52	3,60
				N	53,26	25,49	31,59	54,15	24,93	29,22	2,58	55,50	22,90	25,09	7,34	56,58	22,41	25,41	7,66
				N	53,37	24,92	30,72	57,12	23,24	28,12	4,87	57,39	21,76	24,41	8,13	59,05	21,95	24,93	8,65
				T	76,47	0,33	6,66	77,20	0,32	6,26	0,83	79,23	0,46	5,95	2,85	79,54	0,30	5,62	3,24
CV20	20	0	0	T	79,53	0,19	6,57	79,69	0,17	5,96	0,62	80,69	0,23	5,86	1,12	80,96	0,24	5,65	1,46
				N	69,97	0,66	7,11	77,82	0,84	5,81	7,96	79,72	0,78	5,21	9,93	79,82	0,88	5,61	9,96
				N	74,40	0,64	8,06	78,40	0,66	6,67	4,23	79,21	1,07	6,81	4,99	78,77	1,14	7,17	4,49
				T	67,17	2,73	13,59	72,18	1,52	9,48	6,59	74,54	1,46	9,37	8,59	74,45	1,87	9,87	8,23
CV20_LF5	20	5	0	T	67,28	2,87	13,78	73,07	1,62	9,47	7,33	73,96	1,71	9,98	7,78	74,61	1,73	9,40	8,62
				N	68,96	2,62	12,94	75,50	2,37	11,24	6,76	76,19	2,43	11,06	7,48	77,00	2,48	10,95	8,28
				N	68,35	2,75	13,14	15,54	2,36	11,15	7,47	76,50	2,52	11,25	8,38	77,33	2,42	10,60	9,34
				T	63,66	5,14	17,83	70,49	2,94	12,32	9,05	70,22	3,76	14,55	7,47	71,47	3,44	13,73	8,98
CV20_LF10	20	10	0	T	63,23	4,85	17,19	66,52	3,74	14,62	4,31	70,31	3,36	13,91	7,94	71,10	3,45	13,80	8,67
				N	64,09	5,12	18,48	70,46	4,60	16,54	6,68	72,40	4,23	14,68	9,18	73,46	4,16	14,04	10,41
				N	63,52	5,15	18,23	71,76	4,12	14,94	8,94	73,88	3,93	13,75	11,35	73,95	3,86	13,32	11,60
				T	69,80	6,05	20,70	69,56	6,02	20,38	0,40	69,70	5,98	20,19	0,52	68,59	6,06	19,87	1,47
CV20_LF20	20	20	0	T	66,57	6,36	20,19	68,36	5,87	19,50	1,98	68,03	5,88	19,40	1,73	67,16	5,84	18,91	1,50
				N	67,79	6,48	21,14	63,53	7,54	22,60	4,62	68,63	5,75	15,64	5,61	68,80	5,97	16,81	4,47
				N	66,11	6,81	21,62	63,43	7,75	23,05	71,41	68,00	5,82	15,55	6,44	70,59	5,56	15,23	7,90
				T	59,45	16,92	24,08	62,55	16,33	22,83	3,39	63,38	16,05	22,08	4,49	65,23	15,72	21,45	6,46
CV20_PG1	20	0	1	T	61,73	16,61	23,33	63,77	16,54	22,89	2,09	64,35	16,54	22,74	2,68	64,42	16,14	22,04	3,02
				N	60,50	16,73	23,07	66,23	15,28	21,22	6,19	69,65	12,71	17,05	11,67	69,92	13,21	17,93	11,29
				N	60,99	17,12	23,52	63,70	15,75	21,99	3,39	68,61	12,56	16,15	11,53	97,95	13,36	17,61	9,87
				T	50,88	25,64	30,42	52,88	24,54	29,39	2,50	51,66	24,12	28,12	2,87	53,66	23,88	28,40	3,85
CV20_PG5	20	0	5	T	51,86	25,22	29,90	52,07	25,00	29,10	0,87	52,50	24,75	28,68	1,46	52,62	24,39	28,09	2,13
				N	52,64	26,04	31,87	55,30	23,17	24,18	8,64	60,89	18,36	20,01	16,24	61,26	19,59	21,31	15,09
				N	51,92	25,29	30,08	53,90	24,12	25,86	4,81	60,96	18,83	20,57	14,62	60,83	19,55	21,75	13,48

Tabela A7 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução dos parâmetros a*b* com lodo de fosfatização.

Fonte	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
LF	498,14	0,000000	Sim
CV	16,34	0,000000	Sim
Exposição	169,99	0,000000	Sim
IDD	39,69	0,000000	Sim
LF*CV	15,35	0,000000	Sim
LF*Exposição	6,76	0,000002	Sim
CV*Exposição	5,90	0,000170	Sim
LF*IDD	5,31	0,000000	Sim
CV*IDD	3,11	0,000474	Sim
Exposição*IDD	26,18	0,000000	Sim
LF*CV*Exposição	5,70	0,000000	Sim
LF*CV*IDD	3,33	0,000000	Sim
LF*Exposição*IDD	3,45	0,000009	Sim
CV*Exposição*IDD	1,76	0,056864	Não
LF*CV*Exposição*IDD	2,42	0,000065	Sim

Tabela A8 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à evolução dos parâmetros a*b* com pigmento comercial.

Fonte	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
PG	2185,7	0,000000	Sim
CV	32,9	0,000000	Sim
Exposição	280,0	0,000000	Sim
IDD	57,7	0,000000	Sim
PG*CV	14,2	0,000000	Sim
PG*Exposição	52,2	0,000000	Sim
CV*Exposição	4,4	0,002379	Sim
PG*IDD	17,8	0,000000	Sim
CV*IDD	5,0	0,000001	Sim
Exposição*IDD	30,0	0,000000	Sim
PG*CV*Exposição	6,9	0,000000	Sim
PG*CV*IDD	2,4	0,000650	Sim
PG*Exposição*IDD	10,9	0,000000	Sim
CV*Exposição*IDD	3,4	0,000219	Sim
PG*CV*Exposição*IDD	3,2	0,000008	Sim

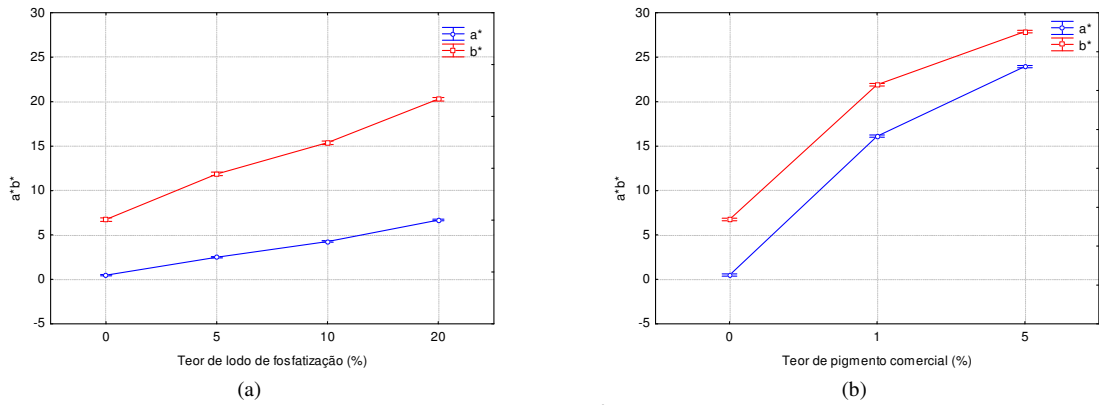


Figura A1 - Efeito isolado do teor de material pigmentante na evolução do parâmetro a^*b^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

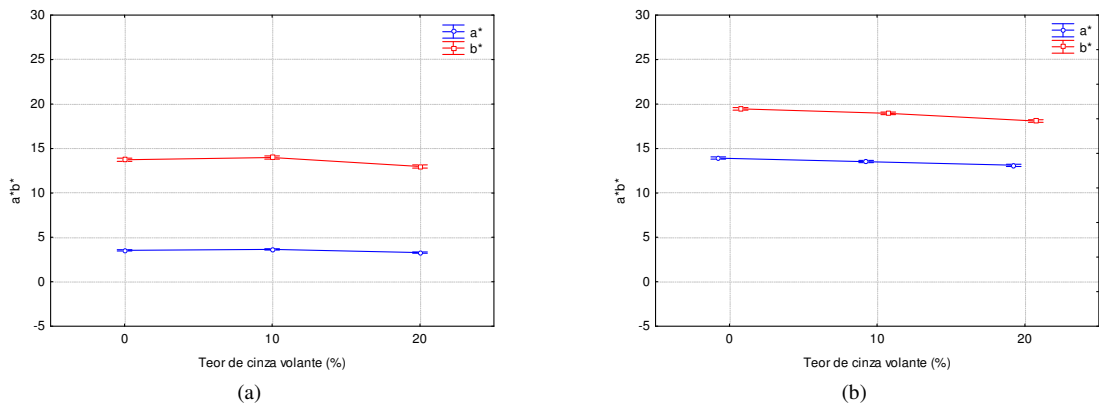


Figura A2 - Efeito isolado do teor cinza volante na evolução do parâmetro a^*b^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

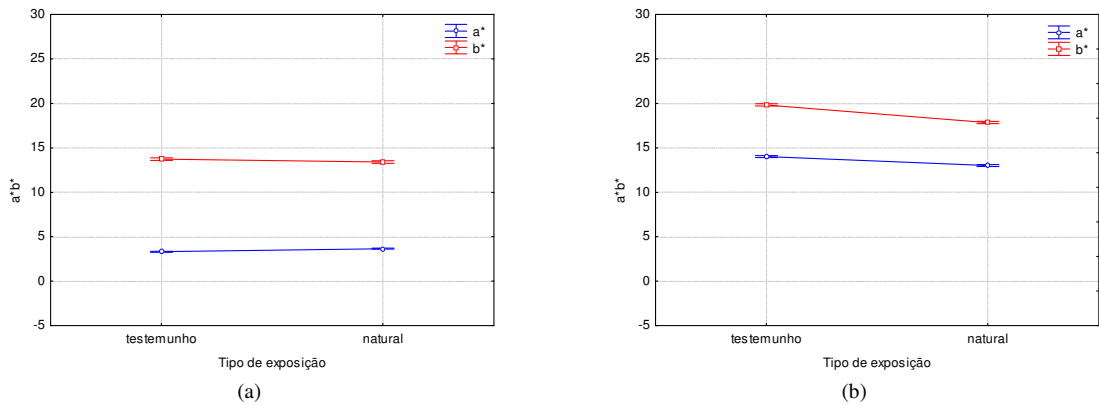


Figura A3 - Efeito isolado do tipo de exposição na evolução do parâmetro a^*b^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.

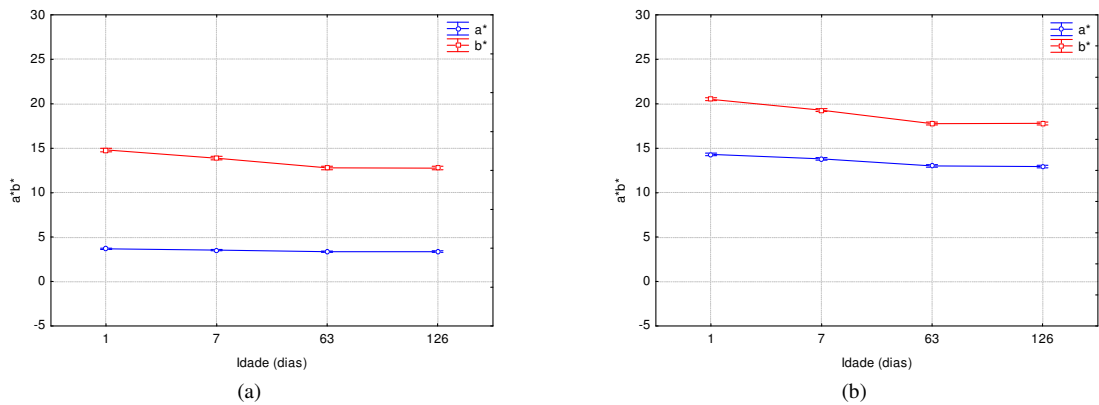


Figura A4 - Efeito isolado da idade na evolução do parâmetro a^*b^* com (a) lodo de fosfatização (b) pigmento comercial.



(a)



(b)

Figura A5 – Imagens digitais do traço REF (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

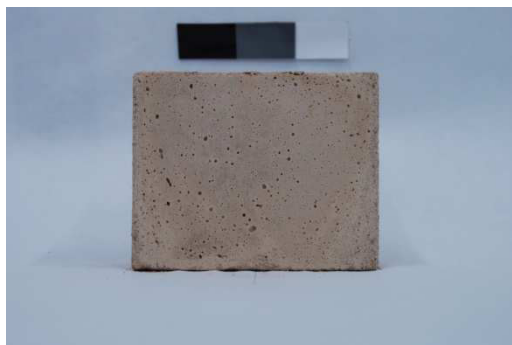


(a)



(b)

Figura A6 – Imagens digitais do traço CV0_LF5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A7 – Imagens digitais do traço CV0_LF10 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A8 – Imagens digitais do traço CV0_LF10 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

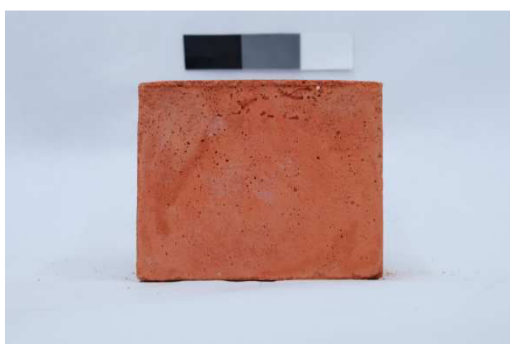


(a)



(b)

Figura A9 – Imagens digitais do traço CV0_PG1 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A10 – Imagens digitais do traço CV0_PG5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A11 – Imagens digitais do traço CV10 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

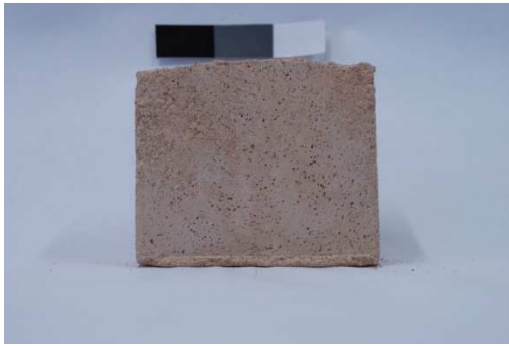


(a)



(b)

Figura A12 – Imagens digitais do traço CV10_LF5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

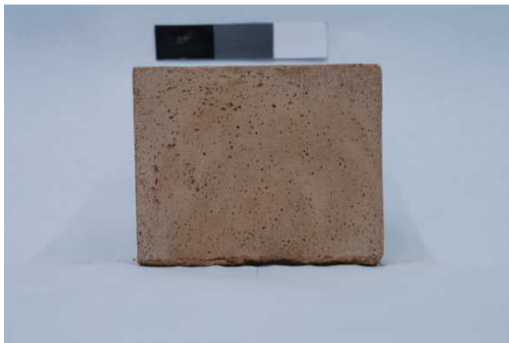


(a)



(b)

Figura A13 – Imagens digitais do traço CV10_LF10 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

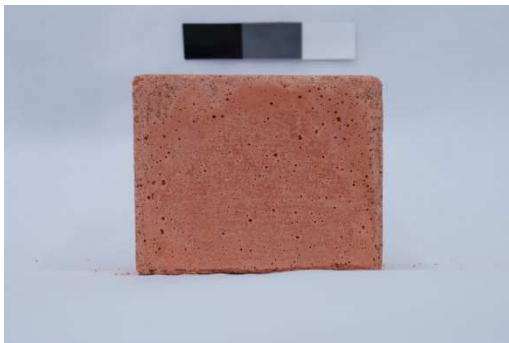


(a)

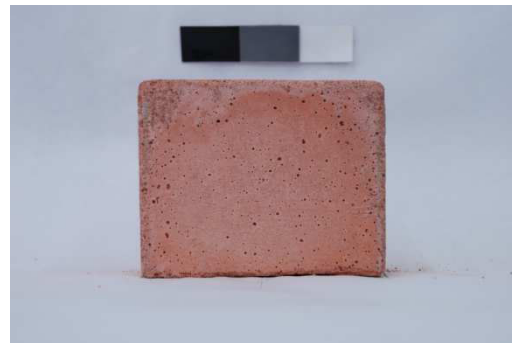


(b)

Figura A14 – Imagens digitais do traço CV10_LF20 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A15 – Imagens digitais do traço CV10_PG1 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

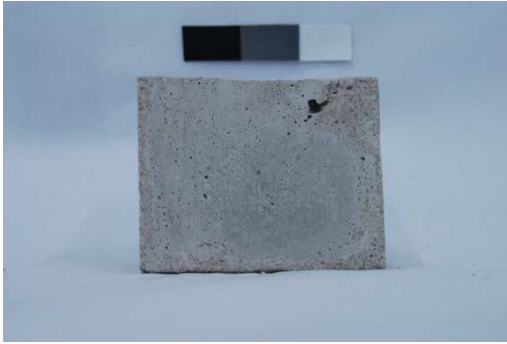


(a)

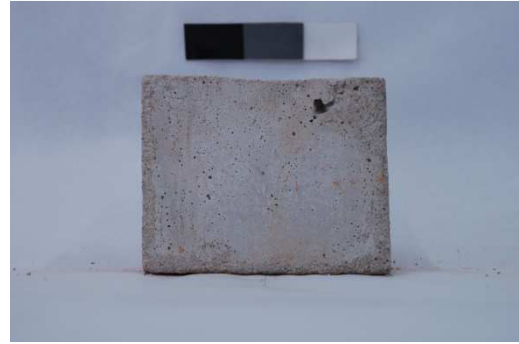


(b)

Figura A16 – Imagens digitais do traço CV10_PG5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A17 – Imagens digitais do traço CV20 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

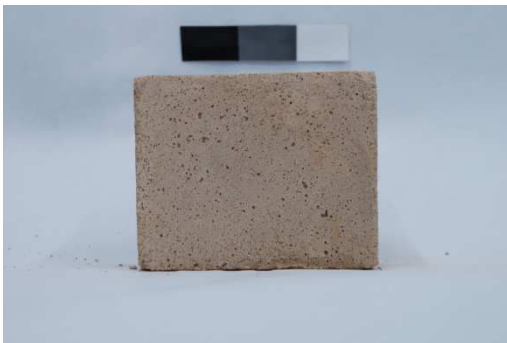


(a)



(b)

Figura A18 – Imagens digitais do traço CV20_LF5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

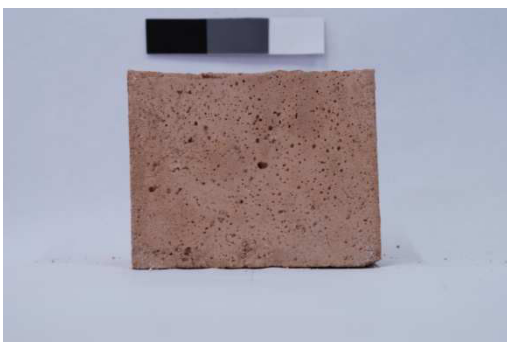


(a)

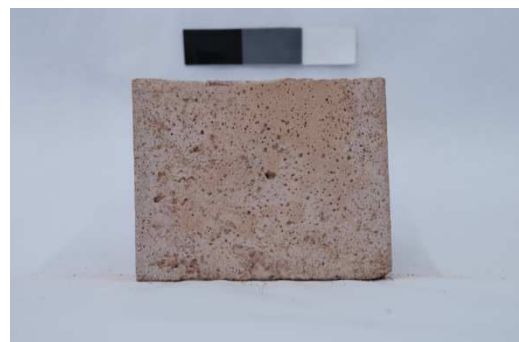


(b)

Figura A19 – Imagens digitais do traço CV20_LF10 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

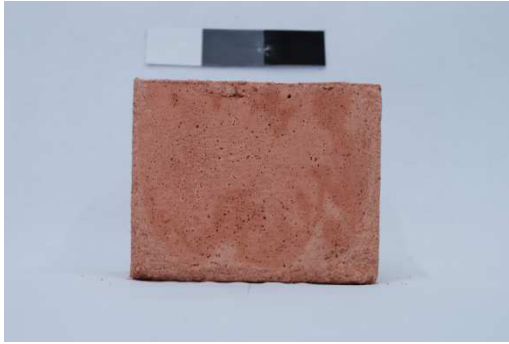


(a)



(b)

Figura A20 – Imagens digitais do traço CV20_LF20 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.

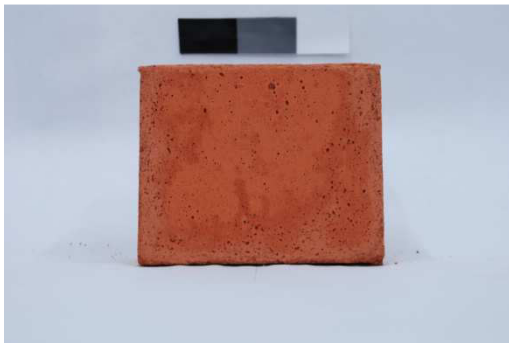


(a)



(b)

Figura A21 – Imagens digitais do traço CV20_PG1 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.



(a)



(b)

Figura A22 – Imagens digitais do traço CV20_PG5 (a) após a desforma (b) aos 126 dias de idade de exposição à intempérie.