

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS EM
PROPRIEDADES DE DURABILIDADE E NA CROMACIDADE DO
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Angela Zamboni Piovesan

Porto Alegre
2009

Angela Zamboni Piovesan

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS EM
PROPRIEDADES DE DURABILIDADE E NA CROMACIDADE DO
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia. Orientação:
Prof.a. Dra. Denise Carpena C. Dal Molin

Porto Alegre
2009

P662e Piovesan, Angela Zamboni

Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco / Angela Zamboni Piovesan. - 2009.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientação: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

1. Cimento Portland branco. 2. Concreto - Durabilidade. 3. Concreto - Propriedades. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Título.

DU-691.32(043)

ANGELA ZAMBONI PIOVESAN

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS EM
PROPRIEDADES DE DURABILIDADE E NA CROMACIDADE DO
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Construção civil, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de Abril de 2009

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Dr. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.a Angela Borges Masuero (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUC-RS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Paulo Sérgio Lima Souza (UFPA)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Especialmente para as pessoas que amo
Meus pais, Cleimar e Lucila
Meu irmão, Francisco
Meu noivo, Walmor.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos meus pais pela grande oportunidade que me proporcionaram nesses dois anos fora de casa, que sem dúvida, foi uma experiência de crescimento única, algo que jamais esquecerei. Agradecê-los pela força e pelos momentos de carinho; minha mãe sempre disposta a me ouvir e aconselhar; meu pai, inspirador na escolha pela engenharia, me fazia sentir o gostinho da comida caseira. Amo vocês.

Ao meu irmão, pelos momentos de muita descontração e companheirismo neste tempo que moramos juntos em Porto Alegre.

Ao meu noivo, pelo amor, paciência e força nas horas de dificuldade. Sou grata pelo carinho que mesmo à distância pude sentir.

Nesse dois anos do mestrado em Porto Alegre pessoas novas cruzaram meu caminho. Nelas, eu depus muita confiança, carinho e amizade.

Agradeço primeiramente à minha grande guia, à professora Denise, pessoa forte e admirável, pela orientação e dedicação.

Aos demais professores do NORIE, Angela, Satler, Formoso, Isatto, Ana e Bonin por todo conhecimento transmitido e bons momentos de descontração na salinha do café.

Aos funcionários do NORIE, Luiz Carlos e Simone, pela grande disponibilidade e ajuda prestada no que quer que fosse. Agradeço de coração à Lucília por todo o auxílio na montagem, execução e interpretação dos ensaios.

Ao pessoal que “coloca a mão na massa”, Airton, Éderson, Diego, Flávio e Fontes, por toda a força que me deram dentro do laboratório, sem vocês meus concretos não tinham sido moldados.

A todos os meus amigos, Cris Pauletti, Daniel, Fran, Ju, Andreos, Carolzinha, Luz, Paulo, Cristiano, Carol e Luiz Fernando pelos momentos de descontração em

nossas jantãs, pela companhia e risadas nos almoços no RU e pelo crescimento nos momentos de discussões de nossas dissertações e teses.

Em especial as minhas irmãs de coração paraenses, Danielle e Luciana, grandes amigas em todas as horas. Vou sentir muitas saudades de tudo que vivenciamos nesses dois anos de mestrado, principalmente das comilanças com temperos diferentes, compras e passeios no shopping e principalmente de nossas risadas.

Às amigas e orientadoras, Ana Paula e Geilma, por todo apoio e auxílio durante a pesquisa, principalmente na reta final.

À bolsista de iniciação científica, Cristina Vitorino, por toda ajuda durante a execução dos ensaios no laboratório.

Ao pessoal do Laboratório de Processamento Mineral, pela cooperação e apoio no ensaio lá realizado.

À Camargo Corrêa Cimentos e Verdicon, pela doação do material utilizado na pesquisa.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES e CNPQ, pelo apoio financeiro.

RESUMO

PIOVESAN, A. Z. Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Sob o ponto de vista de durabilidade, os concretos cromáticos merecem atenção especial, não apenas pelas suas propriedades físicas e químicas, mas principalmente pela sua utilização como elemento arquitetônico, o qual permite a confecção de elementos estruturais aparentes, deixando-os assim mais suscetíveis à ação destrutiva das intempéries. Poucos são os trabalhos publicados que apresentam o comportamento deste material ao longo do tempo e em sua maioria, os pesquisadores avaliam a resistência à compressão como forma de parâmetro de sua qualidade. Neste contexto, o objetivo do trabalho é analisar a influência da adição de pigmentos em algumas propriedades de durabilidade e na cromacidade de concretos de cimento Portland branco. Para isso, montou-se um programa experimental composto por 21 traços diferentes, onde foram realizadas combinações entre 2 tipos de pigmentos inorgânicos de bases químicas diferentes, adicionados em 4 teores (0, 3, 6 e 10%) e com 3 relações a/c (0,40; 0,55 e 0,70). Para cada traço foram moldados 17 cp's os quais se destinam aos ensaios de resistência à compressão, penetração acelerada de cloretos, carbonatação, absorção de água por capilaridade e cromacidade. Todos os resultados experimentais, foram modelados estatisticamente. Os modelos obtidos nos ensaios mostram que o teor de adição e o tipo de pigmento não exercem influência significativa sobre a durabilidade do concreto. O teor de adição, apesar de significativo, pouco alterou a resistência à compressão; houve um acréscimo de cerca de 2 e 5% para os pigmentos verde e vermelho, respectivamente. Quanto à cromacidade; com a adição de 6% do pigmento vermelho o concreto já atinge tonalidades próximas a cor original do pigmento, ao passo que os concretos com pigmentos verde é necessária a adição de 10% para se obter tonalidades mais escuras e mais próximas a cor do pigmento.

Palavras-chave: Concreto cromático. Pigmentos. Cimento Portland branco. Durabilidade. Cromacidade

ABSTRACT

PIOVESAN, A. Z. A study about the influence of the pigments addition in the durability properties and chromaticity of white Portland cement concrete. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Considering the durability of chromatic concrete, one can see it deserves special attention, not only because of its physical and chemical properties, but mainly for its use as an architectonic element, which allows the making of apparent structural elements more susceptible to weather destructions. There are few publications reporting the situation of this material towards time, since most of the researchers evaluate the resistance of chromatic concrete to compression as a parameter to its quality. Within this context, the present study aims to analyze the influence of the addition of pigments into some durability properties and into the chromaticity of the white Portland cement concrete. An experimental program, with 21 different traces, was designed; combinations between 2 types of inorganic pigments from different chemical bases added with 4 contents (0, 3, 6 and 10%) and with 3 relations a/c (0,40; 0,55 e 0,70) were conducted. For each content, 17 cp's were molded to the trials of: resistance to compression, chlorite accelerated penetration, carbonation, water absorption due to capillarity, and chromaticity. All the experimental results were statistically molded. The models obtained in the trials show that the addition content and the type of pigment do not exert significant influence upon the durability of concrete. The addition content, although significant, demonstrated a little difference in terms of resistance to compression; there was an increase around 2 and 5% for the green and red pigments, respectively. For chromaticity, the 6% addition of red pigment makes the concrete color similar to the original pigment, whereas the green pigment requires a 10% addition in order to obtain a darker and more similar color to the original green.

Keywords: Chromatic concrete. Pigments. White Portland cement. Durability. Chromaticity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - compostos principais do cimento Portland.....	30
Tabela 2 - Características dos pigmentos orgânicos e inorgânicos	36
Tabela 3 - efeitos dos aditivos sobre o concreto cromático.....	41
Tabela 4 - efeitos dos aditivos sobre o concreto cromático.....	50
Tabela 5 - variáveis de resposta de interesse de projeto	53
Tabela 6 - fatores controláveis utilizados no experimento.....	54
Tabela 7 - matriz experimental.....	55
Tabela 8 - caracterização química e físico-mecânica do cimento utilizado	56
Tabela 9 – caracterização física do agregado graúdo	57
Tabela 10 - caracterização física do agregado miúdo	58
Tabela 11 - caracterização física do fíler	58
Tabela 12 - caracterização físico-química dos pigmentos utilizados	59
Tabela 13 - dados técnicos do aditivo superplastificante.....	61
Tabela 14 - resultados da dosagem experimental	62
Tabela 15 – proporcionamento dos concretos cromáticos.....	63
Tabela 16 - ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202-92)	72
Tabela 17 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento vermelho (fc)	78
Tabela 18 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (fc)	78
Tabela 19 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento verde (fc)	78
Tabela 20- parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (fc).....	78
Tabela 21 - valores médios obtidos e calculados para o pigmento Vermelho (MPa)	79
Tabela 22 - valores médios obtidos e calculados para o pigmento Verde (Mpa) ..	80
Tabela 23 - análise de variância da taxa de absorção com pigmento vermelho ..	89

Tabela 24 - análise de variância da resistência capilar para o pigmento vermelho	89
Tabela 25 - análise de variância da taxa de absorção com pigmento verde	89
Tabela 26 - análise de variância da resistência capilar para o pigmento verde.....	89
Tabela 27 - valores médios obtidos e calculados para a taxa de absorção (S)	90
Tabela 28 - valores médios obtidos e calculados para a resistência capilar (R).....	91
Tabela 29 - análise de variância da regressão linear com pigmento vermelho (e)	94
Tabela 30 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (e).....	95
Tabela 31 - análise de variância da regressão linear com pigmento verde (e)	95
Tabela 32 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (e).....	95
Tabela 33 - valores médios obtidos e calculados de profundidade carbonatada para o pigmento vermelho	96
Tabela 34 - valores médios obtidos e calculados de profundidade carbonatada para o pigmento verde.....	96
Tabela 35 - análise de variância da penetração de cloretos com pigmento vermelho (Q)	99
Tabela 36 - análise de variância da penetração de cloretos para o pigmento verde (Q)	100
Tabela 37 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento vermelho (Q)	100
Tabela 38 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (Q).....	101
Tabela 39 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento verde (Q).....	101
Tabela 40 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (Q)	101
Tabela 41- valores médios obtidos e calculados de carga passante.....	101
Tabela 42 - análise de variância da razão L^*/a^* para o pigmento vermelho	104
Tabela 43 - análise de variância da razão L^*/a^* para o pigmento verde.....	105
Tabela 44 - análise de variância da razão L^*/a^* para o concreto referência	105
Tabela 45 - teste de DUCAN sobre o efeito isolado do teor de adição – vermelho	107
Tabela 46 - teste de DUCAN sobre o efeito isolado do teor de adição - verde.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Pavimento colorido de concreto [Fonte: ABCP, 200?]; (b) Piso em concreto cromático moldado in loco [Fonte: Kirchheim et al., 2005].....	24
Figura 2 – (a) Passeio central composto por meios-fios brancos e tijolos vermelhos; (b) Diferença acentuada entre os meios-fios cinza e branco[Fonte: PCA, 2002a]	24
Figura 3 – Aeroporto de Dulles [Fonte: PCA, 2001b]	25
Figura 4 – Ciudad de las artes y las ciencias [Cortesia: Ana Paula Kirchheim]	26
Figura 5 – Catedral da arquidiocese de Los Angeles [Cortesia: Ana Paula Kirchheim]	26
Figura 6 – Hotel Marriot [Fonte: PCA, 1999b]	27
Figura 7 – Edifício BMS – Cidade do México [Fonte: Projeto Design]	27
Figura 8 – Museu Iberê Camargo, Porto Alegre - RS.....	28
Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários , aumento de 15000 x (a) Pigmento vermelho; (b) Pigmento verde ..	60
Figura 10 – Diagrama de dosagem do concreto de referência.....	62
Figura 11 – (a) Mistura dos materiais; (b) Abatimento de tronco de cone (Slump) .	64
Figura 12 – (a) Corpos-de-prova após a concretagem; (b) Cura dos corpos-de-prova.....	65
Figura 13 – (a) Corpo-de-prova antes de ser serrado; (b) Corpos-de-prova após serem serrados.....	66
Figura 14 – Representação esquemática de preparação do corpo-de-prova para o ensaio de absorção [adaptado de Kulakoski, 2002]	67
Figura 15 – Esquema da câmara de carbonatação a 6% de CO ₂ [Abreu, 2004] ...	69
Figura 16 – Identificação dos pontos de leitura para o ensaio de carbonatação [Fonte: Kirchheim, 2003]	70
Figura 17 – Ensaio de penetração acelerada de cloretos.....	73
Figura 18 – Espectro visível pelo olho humano (comprimento de onda em nm) [Coelho, 2001].....	74
Figura 19 – Representação do sólido de Cor no espaço L * a* b [Fonte: Minolta, 1998, apud Abitante, 2004]	75

Figura 20 – Resistência à compressão em função do efeito isolado da relação a/c	81
Figura 21 – Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade	82
Figura 22 – Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de adição	82
Figura 23 – Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e a idade; (a) pigmento vermelho; (b) pigmento verde.	83
Figura 24 – Resistência à compressão em função da interação entre a relação a/c e a idade; (a) pigmento vermelho e (b) pigmento verde	84
Figura 25 – Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e a relação a/c; (a) pigmento vermelho; (b) pigmento verde	85
Figura 26 – (a) e (b) MEV concreto referência; (c) e (d) MEV concreto com pigmento vermelho; (e) e (f) MEV concreto com pigmento verde.	87
Figura 27 – Grão do pigmento verde não hidratado no concreto	88
Figura 28 – Taxa de absorção capilar em função do efeito isolado da relação a/c	91
Figura 29 – Resistência capilar em função do efeito isolado da relação a/c	92
Figura 30 – Resultados médios obtidos de absorção para os pigmentos utilizados	93
Figura 31 – Efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação.	97
Figura 32 – Efeito isolado da idade na profundidade de carbonatação	98
Figura 33 – Efeito isolado da relação a/c na carga total passante	102
Figura 34 – Efeito da interação entre a relação a/c e o teor de pigmento na carga total passante para o concreto com pigmento vermelho	103
Figura 35 – Efeito isolado da relação a/c na cor do concreto com pigmento vermelho	106
Figura 36 – Efeito isolado da relação a/c na cor do concreto com pigmento verde	106
Figura 37 – Efeito isolado do teor de adição na cor do concreto com pigmento vermelho	107
Figura 38 – Efeito isolado do teor de adição na cor do concreto com pigmento verde	108

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	O CONCRETO CROMÁTICO	22
2.1	UTILIZAÇÃO DO CONCRETO CROMÁTICO.....	23
2.2	MATERIAIS CONSTITUÍNTES DO CONCRETO CROMÁTICO	28
2.2.1	Cimento Portland Branco Estrutural	29
2.2.2	Agregados	33
2.2.3	Pigmentos.....	34
2.2.4	Adições minerais	38
2.2.5	Aditivos	40
2.3	EXECUÇÃO.....	42
2.3.1	Fôrmas.....	42
2.3.2	Desmoldantes.....	42
2.3.3	Mistura e lançamento	43
2.3.4	Cura e proteção superficial	43
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	45
3	EFEITO DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	46
3.1	EFEITO DOS PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....	46
3.2	EFEITO DOS PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO	47
3.3	EFEITO DOS PIGMENTOS EM RELAÇÃO À DURABILIDADE DO CONCRETO	49
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	51
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	52
4.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	53
4.1.1	Variáveis de resposta	53
4.1.2	Fatores controláveis.....	54
4.1.3	Planejamento do projeto experimental.....	54

4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
4.2.1	Cimento.....	56
4.2.2	Agregados.....	57
4.2.3	Fíler.....	58
4.2.4	Pigmentos.....	59
4.2.5	Aditivo superplastificante.....	60
4.2.6	Água de amassamento.....	61
4.3	MÉTODO DE DOSAGEM.....	61
4.4	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	63
4.5	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	65
4.5.1	Resistência à compressão axial.....	65
4.5.2	Absorção de água por capilaridade.....	65
4.5.3	Carbonatação acelerada.....	68
4.5.4	Penetração de íons cloreto.....	70
4.5.5	Análise colorimétrica.....	73
5	RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	77
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	77
5.2	PARÂMETROS DE DURABILIDADE.....	88
5.2.1	Absorção de água por capilaridade.....	88
5.2.2	Carbonatação acelerada.....	94
5.2.3	Penetração de íons cloretos.....	99
5.3	ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....	104
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
6.1	CONCLUSÕES.....	110
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
	APÊNDICE.....	124

1 INTRODUÇÃO

A grande utilização do concreto armado na construção civil se deve, principalmente, à versatilidade e às vantagens oferecidas por este material. A principal razão para o seu grande consumo é o equilíbrio entre a qualidade e custo, pois nenhum outro material oferece boas qualidades a um custo tão competitivo.

Com o crescente uso do concreto em obras de construção civil surge a busca por novos materiais de construção e novas tecnologias, os quais satisfaçam as necessidades e exigências do mercado. O concreto cromático entra neste contexto, fornecendo novas idéias de criação e valorizando a estrutura de concreto.

A compatibilidade entre as propriedades mecânicas e a cromacidade final contribui para a difusão do uso do concreto cromático na construção civil. O cimento Portland branco associado a agregados coloridos, pigmentos e/ou adições minerais permite a confecção de concretos cromáticos produzidos em várias cores, valorizando a estrutura de concreto como um elemento estético.

A experiência brasileira na utilização desse concreto pode ter sido influenciada pelos italianos, com o uso do cimento Portland branco na confecção de pisos. Grandes áreas pavimentadas, como shoppings e supermercados, têm feito uso extensivo deste tipo de material no Brasil, geralmente com a função de colorir os ambientes (CAMPOS, 2005).

O concreto cromático, atualmente tem grande utilização na confecção de artefatos de cimento, produtos pré-moldados e pisos de concreto, sendo também

utilizados, porém em menor escala em estruturas para fins arquitetônicos, obras civis de grande porte, entre outros.

Segundo Passuelo (2004), o problema da introdução de um novo material, é a necessidade de caracterizar suas propriedades e o seu desempenho ao longo do tempo. Apesar dos estudos realizados em número bastante significativo relacionados a concretos com cimento cinza, há poucas pesquisas relacionadas ao uso do cimento Portland branco e adição de pigmentos, existindo lacunas referentes às propriedades desses concretos, principalmente em relação à durabilidade.

Mesmo com o crescente uso do concreto cromático em obras, o número de trabalhos publicados que apresentam o desempenho deste material ao longo do tempo ainda é muito pequeno. A utilização de pigmentos no concreto é pouco explorada e os efeitos da pigmentação e da interação entre os materiais constituintes são pouco conhecidos no meio científico, sendo esta a motivação principal deste trabalho.

O conhecimento da resistência e da durabilidade do concreto permite a inserção deste material no mercado, com maior confiabilidade de aplicação e uso por engenheiros e arquitetos. A falta de tais conhecimentos pode resultar no aparecimento de manifestações patológicas decorrentes de falhas ao longo do seu processo produtivo e também durante a sua utilização

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Na indústria da construção, assim como em demais setores, muitos produtos são utilizados sem uma avaliação prévia do seu comportamento em serviço. Isso tem caracterizado uma realidade onde um grande número de edificações tem apresentado problemas patológicos, as quais afetam a durabilidade das mesmas (KIRCHHEIM, 2003).

O uso do concreto à base de cimento Portland branco estrutural com adição de pigmentos é uma tecnologia promissora, mas que deve ser bem estudada e implementada, evitando assim que a mesma seja comprometida por resultados não satisfatórios.

Atualmente, o uso de pigmentos na construção civil está baseado no conhecimento e cultura de confecção de obras. Segundo Rojas (2001), a adição de pigmento no concreto não altera a resistência, porém ainda há muitas dúvidas quanto à durabilidade do elemento como um todo, ou da manutenção das características estéticas deste produto. Desta forma, é imprescindível conhecer tecnicamente e cientificamente o comportamento deste material.

Sob o ponto de vista de durabilidade, o concreto cromático merece atenção especial, não apenas pelas suas propriedades físicas e químicas, mas também pelo seu aspecto estético (Vieira e Dal Molin, 2005), onde o uso do cimento Portland branco, associado ou não a pigmentos, permite a confecção de elementos aparentes, deixando-os assim mais suscetíveis à ação destrutiva das intempéries.

Embora o cimento branco estrutural já tenha sido estudado por alguns pesquisadores, tais como Hamad (1995), Fonseca e Nunes (1998), Benitez et al. (2002), Kartz, A. (2002), Benitez et al. (2003), Kirchheim (2003), Rizzon(2006), entre outros, o conhecimento disponível sobre suas propriedades ainda é limitado. No Brasil, existem poucas pesquisas referentes ao desempenho dos concretos com cimento Portland branco, sendo que, muitas obras foram guiadas por princípios desenvolvidos a partir de experiências prévias ou adaptações de resultados obtidos em experiências de obras estrangeiras (Passuelo, 2004).

Estudos relacionados à durabilidade de estruturas de concreto executadas com cimento Portland branco com adição de pigmentos se caracterizam ainda por serem inovadores. Poucos são os trabalhos publicados que apresentam o comportamento deste material ao longo do tempo. Em sua maioria, os pesquisadores avaliam a resistência à compressão do concreto cromático como forma de parâmetro de sua qualidade, onde se podem citar Helene e Galante (1999), Carvalho e Calavera (2002), Costa et al. (2004), Macedo et al. (2004), Hendges et al. (2004), Aguiar (2006).

Um dos primeiros estudos direcionado à durabilidade de concretos de cimento Portland branco no Brasil foi desenvolvido no NORIE/UFRGS por Kirchheim (2003), paralelo à execução do Museu Iberê Camargo. A autora apresenta resultados

sobre a carbonatação e absorção capilar, comparando concretos moldados com diferentes tipos de cimento Portland branco em relação ao cimento Portland CPV-ARI (cinza). Posteriormente, outras pesquisas vieram corroborar com o conhecimento das propriedades dos concretos de cimento Portland branco, como o trabalho de Passuelo (2004), onde a autora analisa os parâmetros influentes na cromacidade e no comportamento mecânico do concreto. Vieira e Dal Molin (2005) avaliaram a resistividade elétrica de concretos produzidos com cimento Portland cinza e branco, Silva et al. (2005) estudaram a absorção em concretos brancos e, por fim, Aguiar (2006) analisou a influência da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão.

Atualmente a utilização do concreto cromático em grandes obras se restringe, além do seu custo elevado, à falta de conhecimento técnico e científico sobre as propriedades e características resultantes da interação entre esses dois materiais, o cimento Portland branco e pigmentos. Neste sentido, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que avaliem o comportamento destes concretos ao longo do tempo, fornecendo diretrizes seguras para a sua produção e emprego. O presente trabalho avança analisando algumas propriedades de durabilidade e a cromacidade desses concretos.

1.2 OBJETIVOS

Como objetivo geral, esta pesquisa visa avaliar a influência da adição de pigmentos em algumas propriedades de durabilidade e na cromacidade de concretos de cimento Portland branco.

Como objetivos específicos, pretende-se analisar:

- a) a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição sobre a resistência à compressão do concreto cromático;
- b) a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição sobre a absorção de água por capilaridade do concreto cromático;
- c) a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição sobre carbonatação acelerada do concreto cromático;

- d) a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição sobre a penetração de íons cloreto do concreto cromático;
- e) a influência da relação a/c e do teor de adição sobre a cromacidade superficial do concreto.

1.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

As limitações da pesquisa estão relacionadas à produção de pigmentos no mercado nacional. Hoje, encontra-se apenas um fabricante de pigmento para concreto, onde, das várias cores produzidas (amarelo, vermelho, preto, marrom, azul e verde), foram selecionadas apenas duas devido ao tempo e custos relacionados ao estudo. Porém, um fator preponderante na escolha de ambas foi a sua base química e o seu valor de mercado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação está estruturada em 6 capítulos, onde cada um está descrito a seguir.

No primeiro capítulo, encontra-se a justificativa da necessidade de pesquisas referentes à durabilidade dos concretos cromáticos, além de apresentar os objetivos geral e específicos, suas limitações e organização do trabalho.

O segundo capítulo faz uma abordagem sobre o concreto cromático, trazendo exemplos de utilização, bem como a caracterização dos materiais comumente utilizados e algumas peculiaridades da sua produção.

No terceiro capítulo estão descritas algumas propriedades dos concretos de cimento Portland branco com pigmentos inorgânicos, ressaltando a importância de estudos sobre a durabilidade ao longo do tempo desse material.

O capítulo quatro apresenta o programa experimental definido para este trabalho, apresentando e justificando a escolha das variáveis de resposta, dos materiais utilizados, dos ensaios executados e procedimentos adotados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos na realização do programa experimental, juntamente com a análise e discussão dos mesmos, correlacionando com outros resultados encontrados na literatura.

O sexto capítulo traz as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 O CONCRETO CROMÁTICO

O concreto é um material que apresenta grandes virtudes sob o ponto de vista da concepção estrutural. Sua baixa permeabilidade, flexibilidade de uso e formas e, principalmente, o seu desempenho mecânico são as principais características que fazem desse material um dos mais utilizados no mundo.

A essas características deve-se incluir a aparência estética obtida pelo concreto quando a ele incorporam-se texturas, cores e formas diferenciadas. Assim, o concreto utilizado anos atrás com função apenas estrutural, tem sua aceitação como elemento arquitetônico aumentada através da incorporação de pigmentos, os quais lhe conferem um importante valor estético.

Nos últimos anos uma nova concepção urbanística esta sendo adotada com grande força. Para a total integração de uma edificação a um determinado entorno, é fundamental a escolha correta dos materiais, textura final das superfícies e, particularmente, das cores, já que estas tem um papel fundamental no efeito estético. Coelho (2001) afirma que através da utilização de cores em edificações urbanas e também em seus pavimentos se consegue um entorno mais agradável e humano, de acordo com as exigências estéticas da sociedade.

Inserir a cor às estruturas cinzas de concreto é uma maneira de torná-las mais atraentes e valorizadas. Segundo Passuelo (2004), pode-se dar cor à superfície do concreto de três formas: pintando a superfície do mesmo depois de endurecido, adicionando pigmentos na mistura, ou simplesmente utilizando cimentos e agregados de cores especiais.

Apesar de inicialmente ser mais caro, a adição de pigmentos ao concreto dispensa a aplicação de revestimentos. Além de estar revestindo e alterando a textura e aparência natural do concreto, muitos tipos de revestimento, como a pintura, possuem uma durabilidade inferior ao material que está recobrindo,

necessitando de um número maior de intervenções durante a vida útil da estrutura.

Entretanto, produzir concretos cromáticos mantendo a durabilidade e o desempenho mecânico dos concretos convencionais não é uma tarefa simples e necessita cuidados diferenciados desde a concepção do projeto arquitetônico, seleção das matérias primas e produção. A seguir serão discutidos alguns aspectos sobre a produção e emprego de concretos cromáticos.

2.1 UTILIZAÇÃO DO CONCRETO CROMÁTICO

A cor, de uma forma ou de outra, sempre esteve presente na construção. Os projetistas as utilizam desde os tempos mais antigos, conferindo às suas obras um valor estético especial (COELHO, 2001).

A utilização do concreto cromático não é recente. Sabe-se que em 1920, a empresa G. & T. Ltda, na Inglaterra, produziu pela primeira vez um concreto cromático. Porém, a primeira obra executada com concreto cromático foi a fábrica de cigarros "The Carreras Black Cat", onde para fabricar o concreto foram misturados cimento Portland e areia colorida em tons ocres, provenientes da África do Sul (COELHO, 2001).

Segundo Passuelo (2004), foi apenas na década de 80 que o concreto cromático voltou a ser utilizado. E a sua crescente utilização se deve à expansão do uso do cimento Portland branco, principalmente nos Estados Unidos, Espanha, Itália e Portugal.

As primeiras peças em concreto cromático no Brasil a ganharem destaque foram pavimentos intertravados, denominados "pavers". Diversas praças e parques foram construídos utilizando esse material, conforme ilustra a Figura 1a. Esse sistema construtivo permite ao projetista a elaboração de desenhos e formas no piso, deixando o local mais atrativo.



Figura 1 – (a) Pavimento colorido de concreto [Fonte: ABCP, 200?]; (b) Piso em concreto cromático moldado *in loco* [Fonte: Kirchheim et al., 2005]

Em Chicago, nos Estado Unidos, passeios e meios-fios estão sendo executados com concreto branco e adição de pigmentos (Figura 2). Tal procedimento evita retrabalhos com pinturas, além de proporcionar melhor visibilidade e segurança aos usuários (PCA, 2002a).



Figura 2 – (a) Passeio central composto por meios-fios brancos e tijolos vermelhos; (b) Diferença acentuada entre os meios-fios cinza e branco [Fonte: PCA, 2002a]

A execução de pisos coloridos não se restringe apenas à fabricação de peças pré-moldadas. Pisos industriais de alta resistência ao tráfego de pedestres e máquinas, moldados *in loco*, também tem grande aplicabilidade. Além de dispensar revestimento, destaca-se o aspecto estético, conforme ilustra a Figura 01b, que é conseguido com a utilização do concreto cromático. A alta refletância apresentada por este material pode ser útil para a redução de energia elétrica,

além do aspecto de higiene que lhe é conferido, sendo muito interessante para pisos em indústrias alimentícias, frigoríficos e hospitais.

A Portland Cement Association (PCA) revela que pisos de cimento branco são mais refletivos, melhorando a iluminação no interior da edificação. As superfícies claras fornecem uma perspectiva que reduz sombras de grandes máquinas, bens amontoados e prateleiras altas. É uma forma passiva de melhorar a iluminação dos ambientes (Portland Cement Association, 2002b).

Já com relação às estruturas de concreto armado feitas com cimento Portland branco, o número de obras executadas com esse material vem crescendo muito nos últimos anos. Pode-se ilustrar diversas obras, como por exemplo o aeroporto de Dulles (Figura 3), nos Estados Unidos, executado com concreto branco e cinza, e com um consumo final de concreto branco de 10.000 m³.



Figura 3 – Aeroporto de Dulles [Fonte: PCA, 2001b]

Na Espanha, destaca-se o conjunto da “Ciudad de las Artes e la Ciência” (Figura 4) em Valencia, projeto do engenheiro e arquiteto Santiago Calatrava. Trata-se de um complexo sócio-cultural composto pelo Cine-Planetário, o Palácio das Artes, o Museu das Ciências e o Parque Oceanográfico. O concreto de cimento branco foi utilizado para compor as mais variadas formas de elementos estruturais (RIZZON, 2006).

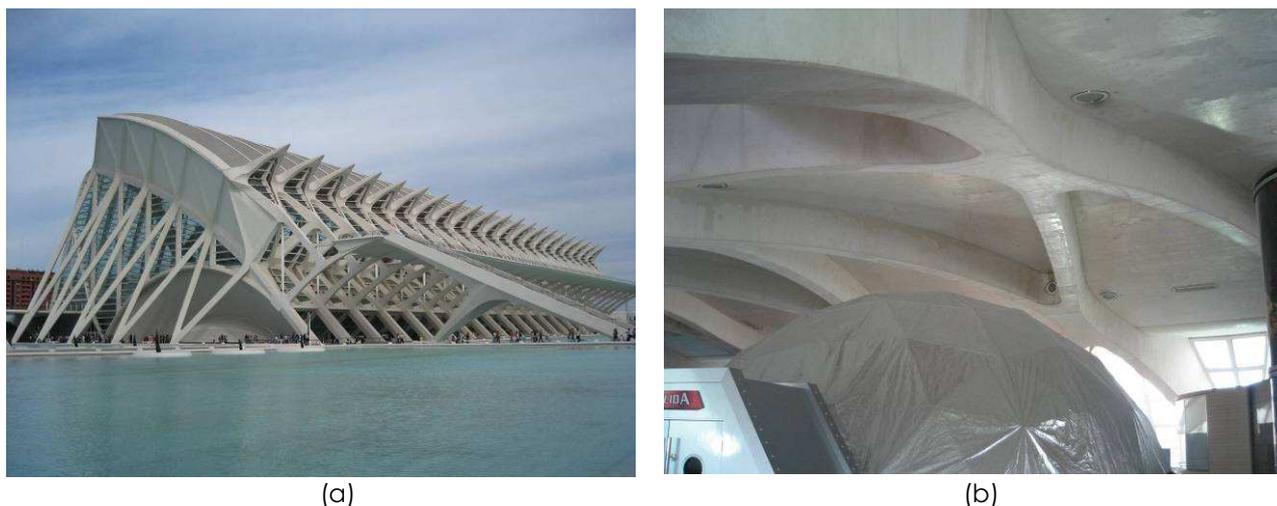


Figura 4 – Ciudad de las artes y las ciencias [Cortesía: Ana Paula Kirchheim]

A partir da adição de pigmentos ao concreto de cimento Portland branco, é produzido o concreto cromático, alcançando as mais diversas tonalidades. No centro de Los Angeles, nos Estados Unidos, está construída a catedral da Arquidiocese de Los Angeles (Figura 5), uma obra grandiosa pela sua arquitetura executada em concreto de cimento Portland branco com pigmento ocre e metacaulim (SELMA e MONTEIRO, 2003).

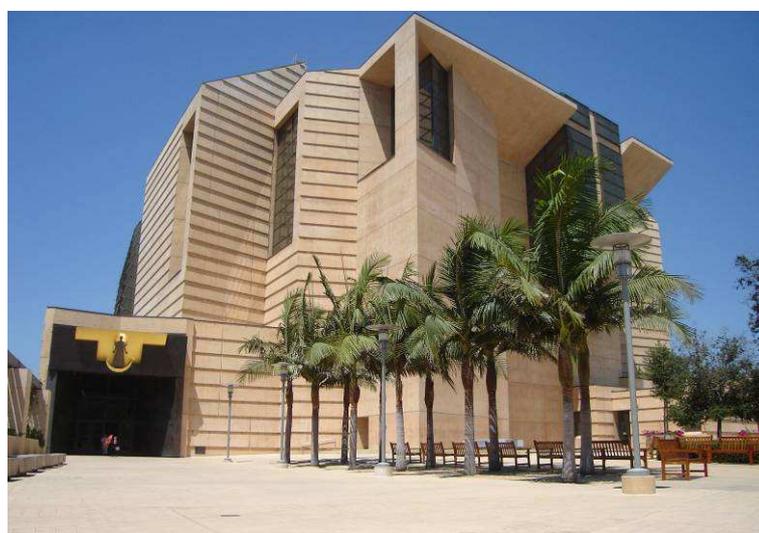


Figura 5 – Catedral da arquidiocese de Los Angeles [Cortesía: Ana Paula Kirchheim]

No Hotel *Marriott*, em São Francisco, placas pré-fabricadas de concreto de cimento Portland branco e um pigmento rosa revestem a sua fachada (Figura 6).



Figura 6 – Hotel Marriot [Fonte: PCA, 1999b]

O edifício da BMS (Figura 7), na Cidade do México, tem seus pilares, vigas e lajes executados com concreto pigmentado e montados no local.



Figura 7 – Edifício BMS – Cidade do México [Fonte: Projeto Design]

No Brasil, em 2000, foi feita a primeira edificação utilizando concreto de cimento Portland branco. A fábrica da empresa Flexotronics, em Sorocaba – SP, foi executada com painéis pré-moldados de concreto branco jateados com areia (KIRCHHEIM, 2003).

O número de obras em concreto utilizando cimento Portland branco e pigmentos vem aumentando no Brasil, podendo-se destacar diversas, como por exemplo, a sede da prefeitura de Indaiatuba, a 90 Km de São Paulo, feita com blocos de concreto tipo "Split" e praças e avenidas na cidade de Blumenau-SC, executadas com blocos de pavimentação de concreto com pigmentos. A ponte construída em 2002, com cerca de dois mil metros cúbicos de concreto branco na cidade de Brusque - SC, juntamente com o Museu Iberê Camargo (Figura 8), em Porto Alegre – RS, são marcos do uso do concreto branco no sul do País.



Figura 8 – Museu Iberê Camargo, Porto Alegre - RS

O número de obras executadas com concreto cromático e, principalmente, com concreto branco, vem crescendo dia a dia, marcando uma nova tendência que valoriza o concreto pelo seu aspecto estético.

2.2 MATERIAIS CONSTITUÍNTES DO CONCRETO CROMÁTICO

Nero e Nunes (1999) afirmam que a adoção de um concreto branco ou cromático está associada a três fatores, sendo eles: satisfação estética, eliminação do revestimento e garantia de durabilidade.

Passuelo (2004) explica que embora estes requisitos sejam fundamentais para um concreto aparente de boa qualidade, o seu atendimento só se torna possível através da adoção de um sistema de controle de execução bastante qualificado.

A Portland Cement Association (PCA – 1999a) atenta para os efeitos dos componentes do concreto cromático na composição final da cor. Entre os fatores que podem alterar a cor podem ser destacados o tipo e a cor do cimento, o tipo e dosagem do pigmento, tipo, graduação, cor e limpeza dos agregados e tipo e dosagem de adições.

Costa et al. (2004) acrescentam que o acabamento superficial do concreto também influencia na coloração, uma vez que quanto mais lisa for a superfície, mais vivas ficam as cores.

A seguir são discutidos os principais componentes de um concreto cromático, analisando sua influência na produção e cromacidade do mesmo.

2.2.1 Cimento Portland Branco Estrutural

O cimento Portland branco estrutural é aplicado em concreto branco e cromático com a finalidade de reproduzir com maior fidelidade a cor desejada, dispensando assim o uso de pintura e outros revestimentos. Sua utilização, com ou sem pigmentos, confere ao local aplicado uma aparência de bem-estar e higienização. É muito utilizado em aplicações aparentes como em obras públicas e de arte, e na sinalização de ruas (KIRCHHEIM, 2003).

De acordo com a NBR 12989 – Cimento Portland Branco (ABNT, 1993), define-se cimento Portland branco como aglomerante hidráulico constituído de clínquer branco, uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições. A norma ainda classifica o cimento Portland branco em dois tipos: o cimento Portland branco estrutural e o cimento Portland não-estrutural.

O cimento Portland branco estrutural se divide em três classes: 25, 32 e 40, sendo que estas representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa, e podem ser utilizados na execução de concreto estrutural. Já os cimentos Portland brancos não-estruturais são utilizados para a fabricação de rejuntas, revestimentos, entre outros usos.

O processo de fabricação do cimento Portland branco é diferenciado do processo dos cimentos cinza. O cimento branco é produzido com baixos teores de óxido de ferro (menos de 3% da massa do clínquer), pois a coloração avermelhada típica desde elemento afeta a cor final da mistura. São evitados outros elementos menores que também induzem a coloração do cimento, como o manganês (Mn), o cromo (Cr) e o titânio (Ti). Geralmente usa-se caulim, juntamente com giz ou calcário livres de impurezas (NEVILLE, 1997).

Para evitar a contaminação do cimento no processo de produção, durante a moagem utiliza-se, no lugar das bolas de aço e moinhos comuns, bolas especiais de níquel e molibdênio em moinhos com revestimentos de pedra ou cerâmica. No forno o combustível deve ser óleo ou gás, evitando-se o uso do carvão (NEVILLE, 1997).

Como consequência de todas essas medidas na produção do cimento Portland branco, o preço final do produto se torna elevado. Esses cimentos custam hoje praticamente o dobro dos cimentos cinza. Alguns cimentos que estão sendo produzidos com adições especiais, que buscam impedir a fixação de partículas e fungos na superfície do material, chegam a custar doze vezes mais que os cimentos cinza.

Quanto à composição química, no Brasil a NBR 12989 (ABNT, 1993) especifica alguns teores limites e exigências químicas para os cimentos brancos estruturais. As propriedades dos cimentos basicamente dependem da composição química de seus quatro compostos químicos principais: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF (Tabela 1).

Tabela 1 - compostos principais do cimento Portland

Composto	Composição em óxidos	Abreviação	Teores (%) CP CINZA	Teores (%) CP BRANCO
Silicato tricálcico	$3 CaO.SiO_2$	C_3S – alita	50 – 70	50 – 70
Silicato dicálcico	$2 CaO.SiO_2$	C_2S – belita	15 – 30	15 – 30
Aluminato tricálcico	$3 CaO.Al_2O_3$	C_3A – aluminato	5 – 10	4 – 13
Ferro aluminato	$4 CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF - ferrita	3 -8	< 1

Fonte: Kirchheim et al. (2005)

Além desses componentes principais podem estar presentes compostos menores, como óxidos de cálcio livres, óxidos de sódio e potássio (denominados álcalis do

cimento), de magnésio, manganês, fosfato, fluoretos e sulfatos. Esses componentes estão presentes no clínquer e suas proporções dependem das composições da rocha calcária e argila (KIRCHHEIM, 2003).

Cada um dos componentes do cimento influenciará nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) são os responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada (TAYLOR, 1992). Os compostos C_3A e C_4AF estão diretamente ligados à hidratação inicial do cimento, influenciando na dosagem, na trabalhabilidade do concreto, na estrutura dos poros e no desenvolvimento da resistência (STÜMER et al., 1994).

Hamad (1995) verificou que o tempo de pega do cimento branco é mais curto quando comparado ao cimento cinza. Isso deve-se ao alto teor de C_3A e ao baixo teor de C_4AF . Kirchheim (2003) explica que a C_3A reage quase que instantaneamente com a água, desprendendo rapidamente grande quantidade de calor e contribuindo para a resistência nas primeiras 24 horas.

Na tentativa de reduzir a velocidade da hidratação do cimento, que decorre da preocupação com o calor de hidratação gerado nas primeiras idades e com a conseqüente possibilidade de fissuração, a indústria já faz uso de técnicas que incluem, por exemplo, o procedimento chamado mineralização do clínquer, que consiste na adição de compostos de flúor e gipsita (CaF_2 e $CaSO_{4.2}H_2O$), que conduz a uma redução do montante de C_3A no cimento abaixo dos 5% (CAMPOS, 2005).

Quanto às características físicas, existem duas diferenças básicas entre o cimento branco e os cimentos convencionais: a finura e o início de pega. Uma vez que a brancura do cimento tende a aumentar com a superfície específica, os cimentos brancos são mais finos que os convencionais, tornando-os mais reativos em contato com a água (FONSECA e NUNES, 1998).

Diante das características apresentadas, pode-se esperar que concretos produzidos com cimento branco apresentem tempos mais curtos de início de pega e maior calor de hidratação quando comparados aos concretos produzidos com cimentos convencionais. Dessa forma, concretagem de elementos estruturais

de grandes dimensões, em concreto branco, necessitam de um cuidado maior em virtude dos problemas apontados.

No que se refere às características mecânicas, o cimento branco apresenta comportamento similar aos cimentos convencionais. Hamad (1995) apresenta um estudo comparativo entre o cimento branco e o cimento convencional, demonstrando que os concretos de cimento branco apresentam valores superiores de resistência à compressão quando comparados aos concretos produzidos com cimento convencional. Já Kirchheim (2003) comparando o cimento branco com o cimento CPV- ARI, afirma que o cimento branco possui resistência mecânica similar ao cimento CPV- ARI.

Quanto às propriedades de durabilidade, Kirchheim (2003) constatou que os concretos moldados com cimento Portland branco possuíram desempenho similar aos concretos moldados com cimento convencional no que diz respeito à carbonatação e absorção de água. Analisando física e quimicamente os cimentos, a autora ainda observou que quanto maior a perda ao fogo, resíduo insolúvel, anidrido carbônico e superfície específica dos cimentos analisados, maior foi a área carbonatada do concreto, para o estudo realizado.

Vieira e Dal Molin (2005), comparando a resistividade elétrica dos concretos produzidos com cimentos Portland branco e convencional, constataram que os concretos de cimento branco apresentam melhor desempenho quando comparado ao concreto produzido com cimento convencional, provavelmente em função de sua natureza química.

Sobre a utilização de cimento Portland branco em concretos, Campos (2005) faz algumas considerações. O autor alerta que cimentos com mais de 10% de C_3A devem ser utilizados, de preferência, com algum estabilizador de misturas, e também deve-se procurar utilizar traços com baixo teor de cimento, abaixo de 350 kg/m^3 . O autor faz as ressalvas em decorrência dos problemas de fissuração e retração apresentados por esse cimento, conseqüência de sua composição química.

2.2.2 Agregados

Os agregados ocupam, normalmente, mais da metade do volume do concreto e, dessa forma, é natural que os mesmos influenciem diretamente no seu comportamento. Mehta e Monteiro (1994) citam que as características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto são: a porosidade, a absorção de água, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial das partículas e os tipos de substâncias deletérias eventualmente presentes.

Dentre todas as características dos agregados, Passuelo (2004) ressalta que a natureza do agregado e a sua granulometria são as que mais afetam a mistura de concreto. Quando se trata de concreto cromático, a cor do agregado se torna também um parâmetro importante de controle.

Para a Portland Cement Association (1999b), agregados especiais não são essenciais para a produção de concretos cromáticos, mas ressalta que materiais de cores claras são os preferenciais.

São inúmeros os agregados que podem ser utilizados na produção do concreto cromático, incluindo os calcários, os basaltos, mármore, granitos, entre outros. A escolha do agregado dependerá dos efeitos estéticos pretendidos. Deve-se, preferencialmente, selecionar e caracterizar adequadamente os agregados a serem utilizados, evitando assim alterações na homogeneidade da mistura e, principalmente, na aparência do produto final. É importante salientar que alterações no teor de finos do concreto poderão provocar variações colorimétricas na superfície (KIRCHHEIM et al. 2005).

Conforme Fonseca e Nunes (1998), o agregado graúdo tem um papel menos relevante, pois normalmente não é visível na superfície do concreto e assim tem pouca influência sobre a cor. São as partículas do agregado miúdo, juntamente com a pasta de cimento e pigmento, que fornecem ao concreto a cor predominante, já que é a argamassa que envolve o agregado graúdo.

Contudo, é possível que os grãos de um agregado graúdo de cor intensa não fiquem totalmente cobertos, resultando no fato de a cor do concreto final ser

afetada pela cor natural do agregado. Embora este efeito possa ser aparente durante a produção do concreto cromático, ele se torna particularmente evidente quando o produto final é exposto às intempéries, à medida que as partículas de agregado se tornam visíveis através do desgaste superficial. O que se vê, então, é uma tonalidade mista composta pela cor da pasta do cimento e do agregado exposto (LANXESS, 2002).

O concreto cromático exige um acabamento superficial primoroso. A camada de pele ou efeito parede necessário para se obter uma superfície lisa e homogênea é conseguida através da utilização de finos na mistura do concreto. Por razões de ordem técnica e econômica, a utilização de fíleres é essencial, pois uma excessiva dosagem em cimento implica em um maior calor de hidratação e maior risco de fissuração (FONSECA E NUNES, 1998).

A maior presença de finos na mistura do concreto tem grande influência na cor final da superfície. O excesso de finos pode clarear o concreto, já que os mesmos apresentam maior superfície específica, requerendo uma quantidade superior de pasta de cimento para manter o efeito parede em concretos aparentes, além de aumentar a demanda de água. Por outro lado, a pequena quantidade de finos prejudica a textura superficial, diminuindo o efeito parede em concretos aparentes (COELHO, 2001).

A granulometria do agregado deve-se manter constante durante todo o processo de produção. Um rígido controle garante uniformidade dos materiais entre as distintas concretagens, evitando variações na trabalhabilidade, na cor e na textura superficial do concreto.

Kirchheim et al. (2005) salientam que o emprego de agregados artificiais na mistura pode afetar a trabalhabilidade e a compactação do concreto, porque a rugosidade e as formas mais irregulares dos agregados dificultam a sua movimentação no concreto fresco.

2.2.3 Pigmentos

O homem utiliza as cores há mais de 20 mil anos. De acordo com investigações, por volta de 3.000 a.C., foram produzidos alguns colorantes inorgânicos sintéticos,

como o Azul Egípcio. Também, os caçadores do Período Glacial pintavam, com fuligem e ocre, as paredes das cavernas reservadas ao culto, criando obras que resistiram muitos anos. Assim como esses, muitos colorantes foram descobertos e usados por centenas de gerações, porém o primeiro colorante orgânico sintetizado com técnica mais apurada foi o Mauve, obtido em 1856, por William H. Perkin, que estudava a oxidação da fenilamina também conhecida como anilina (AGUIAR, 2006).

Os fabricantes dividem os colorantes para concreto e outras aplicações em duas classes: os pigmentos e os corantes, e esses em mais duas categorias, os orgânicos e os inorgânicos. Rojas (2001) especifica que a diferença entre um pigmento e um corante é a sua solubilidade, ou seja, enquanto que os pigmentos são insolúveis, os corantes são solúveis no meio aplicado, água ou qualquer solvente.

Os pigmentos inorgânicos são os mais recomendáveis na área da construção civil. Segundo Coelho (2001), esse tipo de pigmento atende todos os requisitos necessários para uso em concreto e argamassa, que são:

- ser inerte com os demais componentes do concretos e argamassas;
- assegurar e manter a sua cor original;
- apresentar boa resistência à ação da luz e das intempéries;
- apresentar pH estável;
- insolúvel em água;
- misturar-se facilmente com o cimento e os finos do concreto e argamassa.

Os pigmentos mais utilizados atualmente são produzidos a partir da sucata de ferro velho, de onde é extraído o óxido de ferro, conhecido comercialmente como ferrox. As linhas ferrox mais utilizadas são sintéticas, com uma cartela de tonalidades variadas. As cores se multiplicam em tons de amarelo, ocre, areia, terra, laranja, preto, vermelho, entre outras e são muito utilizadas em artefatos de concreto: telhas, pisos, blocos, rejantes, entre outros (ROJAS, 2001).

A versatilidade do óxido de ferro para pigmentos é abrangente, pois diferentes processos de oxidação resultam em cores distintas. A primeira delas é o amarelo, e com uma determinada variação de temperatura tem-se o vermelho. Retirando-se

o oxigênio do processo, obtém-se o preto. As outras cores resultam da combinação desses pigmentos básicos. As cores azul e verde são resultantes dos óxidos de cromo e cobalto, respectivamente, porém seu uso se restringe devido ao alto custo de produção e venda (AGUIAR, 2006).

Os processos de produção dos pigmentos se refinam constantemente com o objetivo de melhorar o brilho e o poder de pigmentação. O objetivo é a produção de partículas de óxido de ferro com uma grande pureza de cor e de pequenas dimensões, que aumentam o seu poder de coloração (COELHO, 2001).

Os pigmentos orgânicos contam com alto poder de tingimento e sua aplicação é muito difundida em diferentes componentes e substratos. São materiais orgânicos sintéticos obtidos através de sínteses químicas, derivados do petróleo e do carvão. Porém, sua utilização no concreto é restringida devido à facilidade de quebras de suas ligações químicas, podendo o produto converter-se em um sal solúvel e manchar a peça de concreto (Revista Pisos Industriais, nº 05, 2006).

De uma forma geral, as principais diferenças entre os pigmentos orgânicos e inorgânicos, quanto às suas aplicações, podem ser resumidas na Tabela 2, onde se tem as características mais importantes dos produtos.

Tabela 2 - Características dos pigmentos orgânicos e inorgânicos

Característica	Pigmentos Inorgânicos	Pigmentos Orgânicos
Estabilidade térmica	Alta	Baixa
Dispersibilidade	Boa	Ruim
Estabilidade às intempéries	Boa	Ruim
Poder de cobertura	Alto	Baixo
Força colorística	Baixa	Alto
Migração / eflorescência	Não ocorre	Possível

Fonte: ROJAS (2001)

Na indústria da construção civil, os pigmentos em pó hoje dividem o mercado com as dispersões aquosas. O produto apresenta como principal vantagem uma maior uniformidade na cor, além da facilidade de manuseio e medição. Porém, devido à proporção relativamente alta de água, o custo de transporte do produto é mais elevado que para pigmentos em pó, havendo ainda a possibilidade de o

pigmento se precipitar no fundo, se o produto não for agitado durante um tempo prolongado (Revista Pisos Industriais/nº 05, 2006).

Os pigmentos, compostos por partículas com tamanho muito pequena, muitas vezes inferior ao tamanho das partículas de cimento. Coelho (2001) afirma que um material com granulometria tão pequena, influencia nas condições de produção do concreto, tanto por sua dimensão como por sua forma.

Sob ponto de vista técnico, segundo Helene e Galante (1999), o concreto colorido e o convencional são idênticos. O pigmento adicionado ao concreto é classificado como material fino (fíler). Trabalhando com produtos com alto poder de pigmentação, a quantidade a ser adicionada fica reduzida e praticamente não altera as propriedades do concreto.

Por outro lado, Lee et al. (2005) ressaltam que devido à finura e à forma das partículas de cada pigmento, é sabido que os mesmos exercem influência sobre a resistência, secagem, retração e a durabilidade dos compósitos de cimento.

Neville (1997) coloca que o uso de pigmentos não deve comprometer a evolução da resistência do cimento nem o ar incorporado. Para se obter uma melhor homogeneidade da mistura sem comprometer as propriedades do concreto é recomendável o uso de aditivos superplastificantes. No entanto Hendges et al. (2004) alerta que é importante verificar a compatibilidade dos pigmentos com o aditivo a ser utilizado.

Lee et al. (2003) sugerem que a utilização de pigmentos inorgânicos à base de óxido de ferro, na confecção de blocos de pavimentação intertravados, não exceda 4% sobre a massa do cimento. Colak (2008), analisando a dureza superficial de blocos de pavimentação em concreto branco com adição de óxido de cromo (pigmento verde), afirma que além do pigmento é necessária também a adição de fíleres calcários para manter as características exigidas comercialmente de cor e resistência à abrasão.

Coelho (2001) explica que quando na produção dos concretos cromáticos se adicionam quantidades crescentes de pigmentos, observa-se que a intensidade da cor aumenta inicialmente de forma linear até um ponto, onde a partir do qual

o aumento da tonalidade é praticamente nulo. Esse ponto é chamado de ponto de saturação. A utilização de pigmentos com grande poder de pigmentação é muito importante, uma vez que se pode chegar ao efeito cromático pretendido com uma quantidade mínima pigmento, e também evitar problemas na produção dos concretos devido à grande quantidade de finos na mistura.

2.2.4 Adições minerais

O uso de adições minerais no concreto, especialmente as quimicamente ativas (pozolanas e cimentantes), é comprovadamente favorável para o desenvolvimento da resistência e melhoria nas propriedades de durabilidade. Passuelo (2004) afirma que para compensar alguns tipos de problemas que podem ocorrer com o uso do cimento Portland branco, devido às suas características, o uso de alguma adição torna-se necessário neste tipo de concreto.

Segundo Malhotra e Mehta (1996)¹ apud Geyer (2001), os benefícios do uso de adições minerais no cimento ou em concretos pode ser dividido em três categorias:

- benefícios de engenharia: dependendo do tipo de adição e da quantidade adicionada, a incorporação de partículas finas na mistura de concreto tende a modificar a trabalhabilidade e a quantidade de água para dar consistência. Além disso, pode-se ter um incremento da resistência, redução da permeabilidade e aumento da durabilidade ao ataque químico;
- benefícios econômicos: algumas adições que são utilizadas no concreto são co-produtos industriais ou resíduos. Desta forma, quando se substitui parte do cimento por esses materiais, pode-se ter uma redução do custo do aglomerante e, por conseqüência, do custo do concreto;

¹ MALHOTRA, V. M. e MEHTA P. K. Pozzolanic and Cementitious Materials. Advances in Concrete Technology. Vol 1, CANEMET, Canada, 1996.

- benefícios ecológicos: a indústria do cimento e do concreto tem se tornado um veículo preferencial para disposição de subprodutos, principalmente porque a maioria dos materiais contaminantes, como metais, podem ser seguramente incorporados na hidratação dos produtos do cimento. No caso do aproveitamento de subprodutos existe um grande ganho ambiental porque se reduz a quantidade de cimento produzido.

Diversos tipos de adições são utilizadas atualmente em concretos. Há aquelas com atividade pozolânica (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, cinza volante- classe F), as que possuem atividade cimentante (escória de alto forno, cinza volante – classe C) e as que não possuem atividade, que são os fíleres (material carbonático, pó de quartzo, pó de pedra, entre outros) (GONÇALVES, 2000).

No caso dos concretos cromáticos deve-se cuidar para que o emprego de adições não altere a cor pretendida do mesmo, já que a fração fina presente na mistura terá forte influencia na coloração final (FONSECA E NUNES, 1998).

Dentre todas as adições usualmente empregadas em concretos, existe uma de fundamental importância na produção dos concretos cromáticos; os fíleres, que são materiais finamente moídos e geralmente inertes, possuem um efeito físico muito importante, preenchendo os vazios deixados pela descontinuidade da curva granulométrica. Esses materiais são necessários para a melhoria da compacidade superficial do concreto (NERO E NUNES, 1999).

Além de contribuir para o acabamento superficial do concreto, esses materiais tem efeito benéfico sobre várias propriedades, tais como a trabalhabilidade, densidade, permeabilidade e tendência à fissuração (NEVILLE, 1997).

Menadi et al. (2008) alertam que em estruturas de concreto expostas ao ambiente marinho, a adição de fíler calcário em quantidades superiores a 15% deve ser evitada. O autor verificou que a adição de fíler em quantidades superiores a 15% aumenta a penetração de íons cloreto e de gás carbônico, principalmente no concretos com baixa relação a/c.

Shi et al. (2008) apontam que em concretos de alta resistência o efeito da incorporação de adições não é tão pronunciado como em concretos convencionais. Ainda, os autores relatam que a resistência à compressão, a permeabilidade e a carbonatação em concreto de alta resistência dependem fortemente da relação a/c e não do tipo de adição, no caso cinza volante, que está sendo incorporada na mistura.

Nos Estados Unidos, a utilização de metacaulim em obras de concreto branco e cromático é bastante difundido, segundo Selma e Monteiro(2002), principalmente por ser um material claro e por misturar-se facilmente com pigmentos.

Avaliando a durabilidade de concretos com cimento Portland branco e adição de 5% de sílica ativa, Kirchheim et al. (2004) concluíram que a adição de sílica é vista como positiva, pois permite que se utilize uma relação a/c levemente superior, favorecendo a trabalhabilidade e o acabamento superficial do concreto, sem que prejudique certas características do concreto que são importantes para garantir a sua resistência e durabilidade.

2.2.5 Aditivos

O uso de aditivos na fabricação de concretos já é amplamente difundido no meio técnico. Neville (1997) explica que o motivo do grande crescimento do uso dos aditivos é sua capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas.

Os aditivos são geralmente classificados pela função que exercem no concreto (Neville, 1997). A NBR 11768 - Aditivos para concreto de cimento Portland fixa as condições exigíveis dos materiais a serem utilizados como aditivos e os classifica em 9 tipos; aditivo plastificante, retardador, acelerador, plastificante acelerador, plastificante retardador, incorporador de ar, superplastificante, superplastificante retardador e superplastificante acelerador.

Nero e Nunes (1999) afirmam que os aditivos desempenham um papel fundamental na qualidade do concreto cromático. Dadas as características especiais do cimento Portland branco, o eventual emprego de agregados

artificiais e a incorporação de finos e pigmentos, a trabalhabilidade de concreto cromático tende a ser menor que a de concretos cinza de mesma relação a/c.

Segundo Fonseca e Nunes (1998), para manter a trabalhabilidade por tempo suficiente de mistura, lançamento e compactação, as dosagens de aditivos requeridas em concretos cromáticos de cimento Portland branco serão normalmente superiores às usualmente empregadas em concretos cinza.

O tipo de aditivo mais utilizado em concretos cromáticos é o superplastificante. Esse tipo de aditivo permite uma redução de água das misturas de até 40%, permitindo a produção de concretos de alta resistência e durabilidade. Os aditivos superplastificantes, quando absorvidos pelas partículas de cimento, atuam por forças de repulsão eletrostática e/ou esférica. O efeito desses fenômenos é o aumento da fluidez e, conseqüentemente, a redução da demanda de água (HARTMANN e HELENE, 2003).

Krasowsky (1997), Fonseca e Nunes (1998) e Coelho (2001) salientam que os aditivos para a fabricação de concretos cromáticos devem ser cuidadosamente avaliados, a fim de determinar seus efeitos sobre a coloração final do concreto, especialmente quando se utiliza cimento Portland branco.

A Tabela 3 traz informações sobre o efeitos dos aditivos nos concretos cromáticos.

Tabela 3 - efeitos dos aditivos sobre o concreto cromático

Aditivo	Efeito no concreto cromático
Plastificante	Facilita a dispersão do pigmento Maior homogeneização
Incorporadores de ar	A base de lignosulfonatos, produzem escurecimento da superfície
Redutores de água	Facilita a compactação Proporciona condições favoráveis à presença de eflorescência
Produtos hidrófugos	Evitam eflorescências

Fonte: VEIT (1994)² apud Coelho (2001)

² VEIT A.M. Suggestion for improving coloured concrete products. Betonwerk Fertigteil Technik. Vol. 60 –n. 11. 1994

A PCA (1999b) alerta que aditivos com lignosulfonato podem transformar um concreto branco em amarelo, e que misturas com cloreto de cálcio não devem ser usadas em concretos cromáticos, uma vez que podem causar a sua descoloração.

2.3 EXECUÇÃO

2.3.1 Fôrmas

Passuelo (2004) afirma que um aspecto importante do concreto é a sua textura superficial. Quanto menos porosa for a superfície de um concreto, mais resistente ele será quanto à penetração de agentes agressivos. A qualidade da superfície do concreto é determinada pela imposição das fôrmas e do adensamento do material (RAMOS, 1991).

O sistema de fôrmas se configura um verdadeiro negativo da superfície do concreto. Qualquer imperfeição na superfície acaba marcado definitivamente as peças em concreto aparente. No caso do concreto aparente, a sua importância torna-se primordial e todos os cuidados na sua concepção, tratamento, aplicação e desmontagem são determinantes (FONSECA E NUNES, 1998).

A escolha do tipo de material a ser utilizado na composição das fôrmas dependerá do tipo da peça a ser concretada, bem como do efeito estético final pretendido. Deve-se ter grande rigor na definição da montagem e, principalmente, na vedação das ligações entre os painéis (juntas), de modo a evitar a perda de nata de cimento. Nero e Nunes (1999) salientam a eventual necessidade de se usar mastiques, silicones e juntas de borracha.

2.3.2 Desmoldantes

Uma criteriosa seleção dos materiais, proporcionamento correto da mistura e uso de formas adequadas pode ser totalmente comprometido com o uso inadequado do tipo de desmoldante.

Segundo Fonseca e Nunes (1998), o uso de desmoldantes convencionais, à base de óleo, em concretos cromáticos, especialmente o concreto branco, pode vir a

manchar completamente a superfície. Os produtos normalmente indicados são à base de água ou parafina incolor, devendo ser aplicados com uma pistola de pintura, de modo a formar uma película muito fina e contínua.

2.3.3 Mistura e lançamento

Os traços dos concretos cromáticos apresentam grande sensibilidade ao processo de mistura, já que são produzidos com baixas relações a/c e apresentam uma quantidade elevada de frações finas. Passuelo (2004) recomenda que sejam realizados estudos prévios quanto à ordem de colocação dos materiais, principalmente quanto ao momento da colocação do aditivo.

Além da ordem de colocação, Helene e Galante (1999) atentam que a medição das matérias primas, pigmento, cimento, agregados e água não deve exceder a um erro máximo de 5%. A utilização de equipamentos modernos faz com que essa exatidão seja fácil de obter.

Além de tudo isso, o processo de adensamento pode influenciar na homogeneidade da cor do concreto. Fonseca e Nunes (1998) não recomendam executar camadas com espessuras superiores a 50 cm, pois ao contrário, o próprio peso do concreto não permitirá a liberação das bolhas de ar que se deslocaram para as faces laterais. A compactação deve ser feita de forma contínua ao longo da peça, de modo a garantir a homogeneidade das diferentes camadas lançadas.

Concretos cromáticos porosos e mal compactados tendem a apresentar com maior frequência a eflorescência. Esse fenômeno pode alterar significativamente a aparência superficial do concreto cromático, que segundo Helene e Galante (1999), é a principal reclamação dos clientes.

2.3.4 Cura e proteção superficial

A cura é umas das fases mais importantes do processo de fabricação do concreto cromático. Deve-se ter muito cuidado ao selecionar o método mais adequado, sobretudo em superfícies planas. Coelho (2001, p.35), citando a norma ACI 302 IR-80, traz a seguinte recomendação:

“As membranas plásticas e papel impermeável não devem ser usadas para curar pisos coloridos porque provocam uma distribuição irregular da umidade sobre a superfície do concreto, resultando em uma superfície com manchas devido à inadequada migração e distribuição dos materiais solúveis do concreto”.

Krasowsky (1997) não recomenda o uso de cura química em concretos cromáticos, pois alguns compostos podem resultar em uma aparência final opaca, escurecendo a superfície.

Geralmente, o concreto cromático deve ser curado com um produto recomendado pelo fabricante do pigmento. Esse produto normalmente é formado por compostos especiais que são formulados exclusivamente para esse emprego (Coelho, 2001).

Uma das maneiras utilizadas para evitar a perda de água é a retirada tardia das fôrmas. Porém a permanência do molde, no caso dos concretos cromáticos, favorece o surgimento de manchas, sobretudo em presença de umidade (Fonseca e Nunes, 1998). Neste caso, a compatibilização desses dois fatores deve ser avaliada perante cada caso em função da sua importância.

Uma grande vantagem do concreto aparente está no seu baixo custo de manutenção, o qual se resume quase sempre a uma lavagem com jato intenso de água, geralmente com o auxílio de soluções de limpeza. Contudo, Fonseca e Nunes (1998) julgam necessária uma proteção superficial à base de hidrófugos de superfície, assegurando uma durabilidade e boa aparência mais duradouras.

Corroborando com Fonseca e Nunes, Passuelo (2004) julga quase obrigatória a utilização de um sistema de proteção em concretos cromáticos, salientando que os mesmos são bastante vulneráveis à fixação de partículas e ao desenvolvimento de fungos e mofo dependendo das suas características de porosidade e textura superficial. A autora ainda ressalta que o tipo de proteção a ser aplicada é aquela que menos altera o brilho e a textura natural do concreto.

No exemplo do concreto branco, Passuelo et al. (2006) analisaram alguns sistemas de proteção que foram considerados como alternativas para a aplicação prática no Museu Iberê Camargo em Porto Alegre – RS. Todos os sistemas de proteção

avaliados (silanos e siloxanos, à base de silicatos e de base acrílica) reduziram a absorção capilar de água do concreto, aumentando a resistência à penetração de água. Os sistemas que apresentaram maior eficiência foram os à base de silanos e siloxanos. Os autores ainda verificaram que a cor do concreto não foi modificada com a aplicação dos sistemas hidrofugantes e à base de silicatos, confirmando que estes tipos de produtos são adequados para a proteção de concretos cromáticos.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo contextualizou-se a tendência de tornar o concreto um material com alto valor estético e não somente como elemento estrutural. Percebeu-se, ainda, o futuro potencial da utilização de concreto cromático com o uso de pigmentos inorgânicos. Como visto, a tecnologia de produção dos concretos cromáticos atenta alguns aspectos relevantes, partindo da seleção dos materiais, sistema de controle e produção do concreto, fôrmas, cura e sistema de proteção superficial. A análise criteriosa de cada um desses fatores, responsáveis pela cor e aparência superficial do concreto, é necessária para se atingir sucesso nessa nova tecnologia.

3 EFEITO DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Através de levantamento bibliográfico realizado, verificou-se que as propriedades dos concretos cromáticos são bastante escassas. São poucos os estudos relacionados à durabilidade dos concretos cromáticos. Em grande parte da bibliografia estudada os trabalhos se limitam a avaliar a influência dos pigmentos na resistência à compressão dos mesmos.

3.1 EFEITO DOS PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

Neville (1997) define a trabalhabilidade como sendo umas das propriedades mais importantes do concreto ou argamassa no estado fresco, pois é ela que determina a facilidade com que os concretos podem ser lançados, adensados e acabados.

Moura (2001) explica que a trabalhabilidade é afetada principalmente pelo teor de água na mistura. Porém outros fatores como a dimensão máxima característica, granulometria, forma e textura do agregado também exercem grande influência. A influência da granulometria está associada à quantidade de água da mistura (NEVILLE, 1997).

Coelho (2001) afirma que a incorporação de pigmentos no concreto geralmente resulta em uma redução de sua trabalhabilidade, tanto pelo tamanho de suas partículas ($< 1\mu\text{m}$) como também pela sua forma. O pigmento amarelo, devido à sua forma acicular, exige uma maior quantidade de água, enquanto que o pigmento preto, de menor dimensão e forma esférica, confere um alto poder de pigmentação e uma maior trabalhabilidade comparado aos outros pigmentos.

Da mesma forma, Lee et al. (2005), investigando os efeitos dos pigmentos inorgânicos sobre a fluidez das argamassas de cimento, verificaram que a fluidez rapidamente diminui com o aumento do teor dos pigmentos vermelho e amarelo, aumentando a demanda de água ou emprego de um aditivo superplastificante. Quanto ao uso dos pigmentos verde e preto, não houve quase nenhuma alteração na fluidez das argamassas.

3.2 EFEITO DOS PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO

Quanto à incorporação de pigmentos no concreto, as investigações sobre as propriedades mecânicas dos concretos cromáticos são bastante escassas. Em sua grande maioria, a bibliografia encontrada trazem alguma referência sobre os efeitos dos pigmentos sobre a resistência à compressão dos concretos.

O desenvolvimento da resistência do concreto está normalmente associado às reações de hidratação da pasta. Moura (2001) relata que as propriedades mecânicas do concreto dizem respeito ao seu potencial de resistir aos esforços a que ele for solicitado. Das propriedades mecânicas, a resistência à compressão é a mais utilizada, devido à relativa facilidade de realização dos ensaios. Porém, propriedades como o módulo de elasticidade e resistência à flexão também são importantes.

Estudos realizados por Symons e Mowat³ (1982 apud Coelho 2001) demonstram que a resistência à compressão do concreto não sofre redução significativa ao incorporar pigmentos na mistura, e se consegue manter a consistência original através de um ajuste na relação a/c. Ainda, os autores relatam que a retração das argamassas que continham pigmentos, foi maior do que as argamassas de referência.

³ MOWAT, G.C; SYMONS, M.G. Physical properties of concrete containing pigments. Institution of engineering. Australia Civil Engineering Transactions. Vol. 24 – n. 2. 1982.

Büchner (1991) afirma que a incorporação de pigmentos no concreto, em proporções adequadas, não causa alterações na resistência à compressão e também na flexão do mesmo. No entanto, o autor considerou que o pigmento amarelo provoca uma redução da resistência à compressão, se usado em proporções acima de 6%. Esta redução na resistência é causada pela alta demanda de água exigida pelo pigmento, como consequência de sua forma acicular e sua finura.

Em um estudo realizado por Goldman e Bentur (1992)⁴ apud Gonçalves (2001), comparando a adição de sílica e negro fumo em concretos de alta resistência, ambos com mesmo tamanho de partículas, demonstrou que o negro fumo causou um ganho de resistência aos 28 dias de 16,8% e a sílica de 30,1%. Os dois materiais apresentaram um densificação da zona de transição.

Costa et al. (2004) produziram concretos cromáticos de alta resistência analisando-os através de ensaios mecânicos, para verificar a influência da incorporação de pigmentos na mistura do concreto. Nos ensaios de resistência à compressão os concretos com adição de pigmentos obtiveram valores ligeiramente inferiores aos do concreto referência, principalmente nas primeiras idades. Nos ensaios de flexão, a adição de pigmentos não provocou alteração nos resultados quando comparados ao concreto referência. Quanto ao módulo de elasticidade, o concreto com pigmento amarelo foi o que obteve menor valor, enquanto que para os demais pigmentos os resultados foram semelhantes ao concreto referência.

Hendges et al. (2004), assim como Alencar et al. (2005), atribuem a queda na resistência do concreto à medida que há um incremento na pigmentação, ao aumento da superfície específica do concreto que, de maneira geral, demanda maior quantidade de água, principalmente para os pigmentos vermelho e

⁴ GOLDMAN, A. , BENTUR, A. E. Effects of pozzolanic and non-reactive microfillers on the transition zone in high strength concretes. In: MASO, J.C. (ed.) RILEM, International Symposium on Interfaces Cementations Composites. Toulouse, 1992.

amarelo. Quanto à utilização do pigmento preto, não houve queda na resistência à compressão na medida que houve acréscimo de pigmento.

O efeito da pigmentação nas propriedades do concreto endurecido é muito semelhante ao efeito da adição de fíleres. O pigmento quanto adicionado ao concreto em porcentagens crescentes de adição, gera, em função da sua alta finura, um aumento na demanda de água para manter a trabalhabilidade da mistura. Sabe-se que quanto maior a quantidade de água na mistura, mais poroso e menos resistente fica o concreto. Para contornar essas questões, recomenda-se o uso de aditivo superplastificante, o qual manterá a trabalhabilidade desejada, sem alterar as propriedades do concreto.

3.3 EFEITO DOS PIGMENTOS EM RELAÇÃO À DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade de uma estrutura de concreto é a capacidade de a mesma desempenhar as funções que lhe foram atribuídas, durante um período de vida útil previsto. Portanto, o concreto deve suportar o processo de deterioração ao qual venha a ser submetido, seja ele por fatores externos ou por causas internas ao próprio concreto (NEVILLE, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as principais causas de deterioração das estruturas de concreto são: corrosão das armaduras, ciclos de congelamento e degelo, agentes químicos externos agressivos e agentes físico-químicos internos. Conforme ressaltam esses autores, a deterioração das estruturas representada pela sua principal causa, a corrosão das armaduras, instala-se devido à permeabilidade do concreto, seja por deficiência na dosagem ou de espessura da camada de cobrimento, seja por microfissuras causadas pela ação de efeitos externos ou internos.

Neville (1997) cita que são três os principais fluidos que podem penetrar no concreto e interferir na durabilidade do mesmo: água, pura ou com íons agressivos; dióxido de carbono e oxigênio. A durabilidade do concreto dependerá muito da facilidade com que esses fluidos penetram e da forma com que eles se deslocam no interior da estrutura.

Na estrutura do concreto o que determina qual o mecanismo de transporte dominante é a configuração dos poros (tipo, tamanho e distribuição dos poros ou microfissuras) e porcentagem preenchida com água (NEVILLE, 1997). Essa configuração interna de poros é fortemente afetada por diversos fatores, incluindo a composição química do cimento, a relação a/c, o tipo e quantidade de adições minerais, a distribuição granulométrica dos materiais cimentícios e agregados, entre outros (KIRCHHEIM et al., 2004).

De forma geral, a durabilidade dos concretos está diretamente ligada à resistência do mesmo. Coelho (2001) afirma que a influência da adição de pigmentos no concreto com respeito à durabilidade do concreto está diretamente ligada à permeabilidade do mesmo. A adição de pigmentos em grandes quantidades podem aumentar a permeabilidade do concreto, devido a maior quantidade de água exigida, conseqüência do aumento da superfície específica e da quantidade de finos na mistura.

Alencar et al. (2005) avaliaram a influência da adição de pigmentos na durabilidade de concretos com cimento cinza e branco. Em suas conclusões, notaram que os pigmentos com maior superfície específica, que demandaram uma quantidade superior de água, apresentaram resistências inferiores e, assim, maior profundidade carbonatada e maior capilaridade, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - efeitos dos aditivos sobre o concreto cromático

Traço	f _c (MPa)	Profundidade carbonatada (mm)	Absorção de água (g/cm ²)		
			24 h	48 h	72 h
CB	58,5	0,67	0,491	0,573	0,565
CC	42,6	0,50	0,676	0,892	0,975
CB + 4% PV	54,8	0,76	0,644	0,739	0,873
CC + 4% PV	36,2	0,62	0,663	0,867	0,975
CB + 7% PA	52,0	0,78	0,586	0,739	0,848
CC + 7% PA	35,3	0,68	0,803	1,070	1,120
CC + 8% PP	42,8	0,54	0,733	1,000	1,090

Fonte: Alencar et al. (2005)

Coelho (2001) também verificou o efeito diferenciado da adição de pigmentos sobre os concretos com cimento cinza e branco. Houve um decréscimo na taxa

de absorção dos concretos com cimento cinza e pigmento, e um aumento moderado da taxa absorção nos concretos de cimento branco e pigmentos.

Tais pesquisas iniciam a caracterização das adições de pigmentos no concreto, porém há muito ainda que contribuir para o avanço da utilização desses materiais. E é nesse sentido que esta pesquisa vem colaborar, avaliando a durabilidade de concretos cromáticos com pigmentos inorgânicos em diversas porcentagens e com variações na relação a/c.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Em sua grande maioria, as pesquisas citadas, que abordam o assunto durabilidade do concreto cromático, poucas são as considerações sobre a influência da adição dos pigmentos no seu comportamento e quando assim o fazem, as propriedades mecânicas são o principal foco do estudo.

Pesquisas científicas sobre a durabilidade de concretos cromáticos são de fundamental importância para uma segura implementação e uso desse material, e nota-se que pouquíssimas pesquisas abordam o tema. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos que avaliem a durabilidade dos concreto cromáticos.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento experimental permite maior eficiência na obtenção de informações em um experimento. Possibilita, também, obter um maior número de informações a um menor custo e tempo, assegurando maior confiabilidade nos resultados obtidos (RIBEIRO e CATEN, 2000).

A metodologia de projetos de experimentos vem sendo aplicada na Engenharia Civil, observando-se uma preocupação crescente dos pesquisadores em comprovar estatisticamente as suas conclusões. Em pesquisas na área de materiais de construção civil, os experimentos geralmente envolvem um grande número de fatores. Assim, torna-se necessário estudar o efeito de todas as interações possíveis entre os fatores na variável de resposta (DAL MOLIN et al., 2005).

O programa experimental dessa dissertação foi baseado em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis de controle em diversos níveis e, posteriormente, utilizar ferramentas estatísticas para avaliar a influência de cada variável, bem como a interação entre elas, nas variáveis de resposta.

O planejamento estatístico teve início com a definição das variáveis de resposta necessárias para alcançar os objetivos deste trabalho. Além disso, foi necessário estabelecer os fatores controláveis e seus níveis, bem como o número de corpos-de-prova necessários para a realização dos ensaios.

A execução do experimento foi desenvolvida parte no NORIE (Núcleo Orientado para Inovação da Edificação) e parte no LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais), laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que possibilita a análise da cromacidade, das propriedades mecânica e de durabilidade do concreto, frente aos fenômenos de carbonatação, penetração de íons cloreto e absorção de água em concretos de cimento Portland branco com adição de pigmentos.

4.1.1 Variáveis de resposta

A fim de avaliar a resistência à compressão, parâmetros de durabilidade e a cromacidade do concreto feito de cimento Portland branco com adição de pigmentos, definiu-se as variáveis de resposta de interesse do projeto experimental. Essas variáveis estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - variáveis de resposta de interesse de projeto

Variável de resposta	Tipo	Unidade
Resistência à compressão	Maior é melhor	MPa
Taxa de absorção capilar	Menor é melhor	g/cm ² .h ²
Resistência capilar	Maior é melhor	h/m ²
Profundidade de carbonatação	Menor é melhor	mm
Penetração de cloretos	Menor é melhor	coulombs
Refletância	-	-

Dentre todas as características apresentadas pelo concreto, a resistência à compressão é fundamental. No projeto estrutural do concreto o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Isso se deve, provavelmente, a maior facilidade em aferir esta propriedade. Segundo Costa et al. (2004), ela é usada freqüentemente como índice para controle da qualidade.

Como já apresentado no Capítulo 3, a principal causa da degradação das estruturas de concreto deve-se, principalmente, à entrada de agentes agressivos no mesmo, tais como cloretos, sulfatos, gás carbônico e água. O comportamento do concreto quanto à durabilidade pode ser avaliado de acordo com algumas

características (Moura, 2000), e essas, podem ser determinadas através de ensaios que quantifiquem o ingresso desses agentes no concreto.

Diante disso, foram selecionadas variáveis de resposta que pudessem representar o ingresso de íons cloreto (penetração de cloretos), gás carbônico (profundidade de carbonatação) e água (taxa de absorção e resistência capilar) no concreto e que estão descritos nos ensaios propostos.

O estudo ainda contempla uma análise colorimétrica do concreto, para melhor quantificar a variação da cor, conforme foram sendo alterados os teores de adição de pigmento e a relação a/c.

4.1.2 Fatores controláveis

Uma vez definidas as variáveis de resposta, foram escolhidos os fatores controláveis (Tabela 6), dos quais este trabalho procura avaliar a significância sobre estas variáveis.

Tabela 6 - fatores controláveis utilizados no experimento

Fatores controláveis	Níveis adotados
Relação a/c	0,40; 0,55; 0,70
Idade (resistência à compressão)	7, 14, e 28 dias
Pigmentos inorgânicos	Tipo A e tipo B
Teor de adição de pigmento	0%, 3%, 6% e 10%

As duas primeiras variáveis listadas acima têm influência direta no desempenho mecânico e de durabilidade do concreto, sendo que a primeira contempla as três relações a/c limites dos concretos convencionais (classe I). Já as outras duas variáveis estão relacionadas com a avaliação da cromacidade do concreto, bem como possíveis alterações, a serem avaliadas, nos parâmetros de durabilidade e resistência à compressão.

4.1.3 Planejamento do projeto experimental

A descrição do projeto experimental compreende a definição de todos os fatores envolvidos na pesquisa bem como o número de repetições, sempre tendo em

vista as restrições experimentais, tais como recursos econômicos, tempo, espaço físico, entre outras. A partir do conhecimento desses aspectos foi definido o projeto experimental.

Na Tabela 7, pode-se visualizar a matriz experimental resultante. Também, estão identificadas todas as possíveis combinações e essas combinações se repetem para cada ensaio realizado na pesquisa.

Tabela 7 - matriz experimental

Tipo de cimento		Ref.	Tipo de pigmento					
			A (vermelho)			B (verde)		
Portland branco estrutural			Teor de adição					
		3 %	6 %	10 %	3 %	6 %	10 %	
a/c	0,40	X	x	X	x	x	X	x
	0,55	X	x	X	x	x	X	x
	0,70	X	x	X	x	x	X	x

Dessa forma, esse projeto compreende 21 combinações, com 1 repetição por traço, totalizando 21 betonadas aleatorizadas em 5 dias de trabalho. Para cada combinação foram moldados:

- 11 cp's cilíndricos de 9,5x19,5 cm, onde 9 cp's foram destinados para resistência à compressão e 2 para o ensaios de penetração acelerada de cloretos;
- 2 cp's prismáticos de 10x10x20 cm para o ensaio de absorção capilar;
- 4 cp's 4x4x16cm para carbonatação.

Por questões de tempo e de logística de entrega dos pigmentos, foram moldados primeiramente os traços referência e os que continham o pigmento vermelho.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Por se tratar de concreto branco pigmentado, fez uso de materiais e agregados diferentes dos usualmente empregados na produção dos concretos convencionais. O cimento Portland utilizado é branco e os agregados são de origem calcária, também na cor branca. Esses materiais são comumente utilizados

em obras e estruturas feitas com concreto branco. A seguir descreve-se cada um deles.

4.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi um cimento Portland branco estrutural de origem nacional. A Tabela 8 apresenta as características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado. A caracterização química foi efetuada no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER/UFRGS através de fluorescência de Raio x, e as caracterizações física e mecânica, fornecidas pelo fabricante do cimento.

Tabela 8 - caracterização química e físico-mecânica do cimento utilizado

Características químicas		
Principais compostos		Resultados (%)
CaO		66,006
SiO ₂		17,156
SO ₃		4,677
Al ₂ O ₃		2,482
MgO		2,219
K ₂ O		0,446
SrO		0,351
Fe ₂ O ₃		0,305
TiO ₂		0,197
P ₂ O ₅		0,105
Na ₂ O		0,104
MnO		0,036
C ₃ S		121,148
C ₂ S		-
C ₃ A		6,063
C ₄ AF		0,928
Características físicas		
Massa específica (kg/dm ³)		2,99
Superfície específica (cm ² /g) - Blaine		4772
Finura # 325 (45mm)		1,88
Diâmetro médio (µm)		10,35
Perda ao fogo (%)		9,81
Tempo de pega	Início (min.)	160
	Fim (min.)	205
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	33,70
	7 dias	39,80
	28 dias	48,00

4.2.2 Agregados

Na escolha dos agregados, procurou-se selecionar rochas de tonalidade clara, a fim de evitar alterações na cor final do concreto. Assim, definiu-se trabalhar com agregados provenientes da britagem de rochas calcárias. O agregado utilizado é oriundo de Caçapava do Sul - RS, município responsável pela produção de mais de 85% do calcário do Estado do Rio Grande do Sul.

4.2.2.1 Agregado graúdo

As características do agregado graúdo, bem como a sua distribuição granulométrica, estão relacionadas na Tabela 9.

Tabela 9 – caracterização física do agregado graúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
Composição granulométrica	NM 248	ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		9,50	1	1
		4,80	93	94
		2,40	6	100
		1,20	0	100
		0,60	0	100
		0,30	0	100
		0,15	0	100
		< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica	NM 248	9,50 mm		
Módulo de finura	NM 248	5,94		
Massa específica	NBR 9776	2780 kg/m ³		
Massa unitária	NM 45	1403,5 kg/m ³		

4.2.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é de origem calcária, disponível comercialmente e muito utilizado na produção de concretos brancos. As características físicas e a distribuição granulométrica da areia estão relacionadas na Tabela 10.

Tabela 10 - caracterização física do agregado miúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira ABNT (mm)	Porcentagem retida Individual Acumulada	
Composição granulométrica	NM 248	4,80	2	2
		2,40	27	29
		1,20	23	52
		0,60	17	69
		0,30	12	81
		0,15	10	91
		< 0,15	9	100
		Dimensão máxima característica	NM 248	4,80 mm
Módulo de finura	NM 248	3,24		
Massa específica	NBR 9776	2790 kg/m ³		
Massa unitária	NM 45	1505,07 kg/m ³		

4.2.3 Fíler

Com o objetivo de melhorar o acabamento final do concreto aparente, e assim reproduzir o que é comumente feito em obras de concreto aparente, utilizou-se um fíler, também de origem calcária e proveniente do município de Caçapava do Sul – RS. As características físicas e a distribuição granulométrica do fíler estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - caracterização física do fíler

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira ABNT (mm)	Porcentagem retida Individual Acumulada	
Composição granulométrica	NM 248	4,80	0	0
		2,40	0	0
		1,20	3	3
		0,60	18	21
		0,30	20	41
		0,15	26	67
		< 0,15	33	100
		Dimensão máxima característica	NM 248	1,2 mm
Módulo de finura	NM 248	1,32		
Massa específica	NBR 9776	2810 kg/m ³		
Massa unitária	NM 45	1574,28 kg/m ³		

4.2.4 Pigmentos

Com o objetivo de comparar o efeito da adição de pigmento em algumas propriedades de durabilidade, na resistência à compressão e na cromacidade do concreto, foram utilizados dois pigmentos com bases químicas diferentes. O pigmento inorgânico de coloração vermelha é à base de óxido de ferro, com fórmula química Fe_2O_3 . O pigmento verde é à base de óxido de cromo (Cr_2O_3). De acordo com o fabricante, esses pigmentos não têm efeito tóxico nem irritante sobre a pele ou membranas mucosas. Entretanto, a geração de poeira deve ser evitada por motivos básicos de saúde ocupacional.

As características físicas e químicas de ambos encontram-se na Tabela 12. A caracterização química foi efetuada no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER/UFRGS e a caracterização física fornecida pelo fabricante dos pigmentos.

Tabela 12 - caracterização físico-química dos pigmentos utilizados

Características químicas			
Principais compostos	Resultado (%)		
	Pigmento Vermelho	Pigmento Verde	
Fe_2O_3	97,622	0,050	
Cr_2O_3	0,038	78,494	
SO_3	0,706	0,131	
F	-	19,574	
SiO_2	0,193	0,125	
ZnO	0,129	-	
CaO	0,091	0,044	
Al_2O_3	0,081	1,092	
MnO	0,059	-	
P_2O_5	0,295	-	
CO_2	1,05	0,490	
Características físicas			
Finura # 325 (%)	max.	0,3	-
Forma da partícula	-	acicular	esférica
Diâmetro médio (μm)	-	0,53	0,83
Superfície específica (m^2/g)	-	10,71	8,08
pH	min.	3,0	5,0
	máx.	6,0	7,0
Absorção de óleo ($g/100g$)	-	23	11
Umidade (%)	max.	0,5	0,3
Sais solúveis (%)	max.	0,5	0,005
Densidade específica (g/cm^3)	aprox.	4,7	5,2
Densidade aparente (g/cm^3)	min.	0,7	-
	max.	1,1	1,1

A Figura 9 mostra a microscopia eletrônica de varredura (15000 x) dos pigmentos. Observa-se a forma diferenciada de suas partículas. O pigmento vermelho tem forma acicular e partículas menores que 1µm, já o pigmento verde tem forma esférica e partículas também inferiores a 1µm.

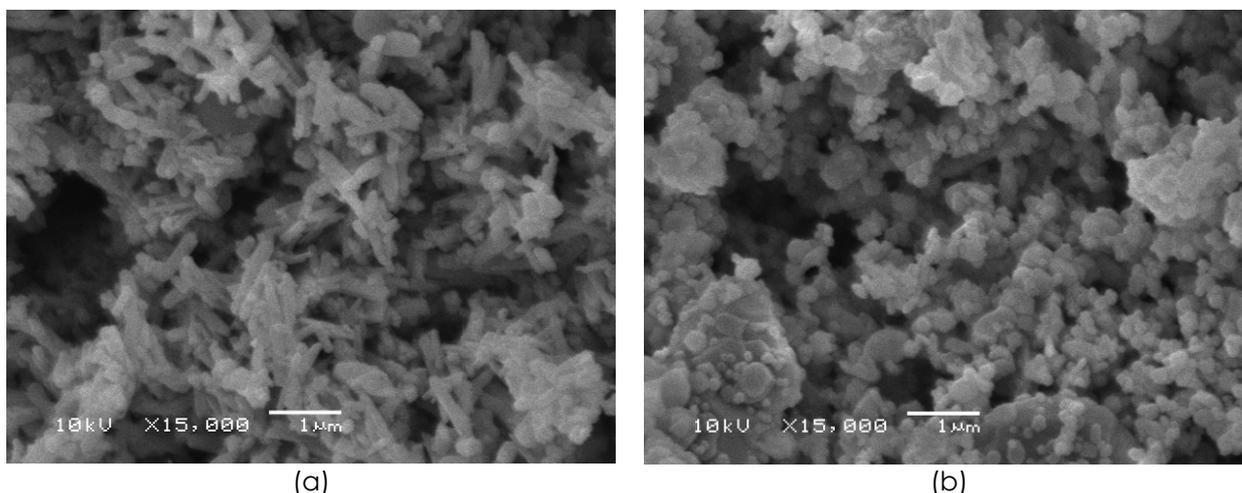


Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, aumento de 15000 x
(a) Pigmento vermelho; (b) Pigmento verde

4.2.5 Aditivo superplastificante

Fonseca e Nunes (1998) explicam que o consumo de cimento utilizado em concretos brancos, de forma similar como 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. Aliada a essa característica, a granulometria mais fina do cimento branco também aumenta a quantidade de água requerida no concreto.

Para contornar esta questão de demanda de água e garantir uma melhor homogeneização dos materiais e assim, a uniformidade da cor, utilizou-se um aditivo superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado. Segundo informações do fabricante, este aditivo é isento de cloretos e atende às prescrições da norma ASTM C 494 (tipos A e F), ASTM C 1017 e é, também, compatível com todos os cimentos que atendem a ASTM 150.

As informações técnicas do aditivo utilizado, pode ser visualizada na Tabela 13.

Tabela 13 - dados técnicos do aditivo superplastificante

Função principal	Superplastificante de 3ª geração
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Bege
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5%
Viscosidade	95 a 160 cps

Fonte: BASF (2007)

4.2.6 Água de amassamento

A água utilizada na pesquisa tem condições de potabilidade e é proveniente da rede de abastecimento local.

4.3 MÉTODO DE DOSAGEM

Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, descrito por Helene e Terzian (1992). Como parâmetro de controle, adotou-se o abatimento de tronco de cone de 200 ± 20 mm, sendo esse considerado um valor ideal para contornar problemas de perda de consistência durante a moldagem dos corpos-de-prova, além da necessidade do uso de 1,2% de aditivo superplastificante (obtido experimentalmente). Esse comportamento é devido às características peculiares do cimento branco, como o alto teor de C_3A , que já fora anteriormente estudado e relatado por Kirchheim (2003).

Determinou-se também, a utilização de um teor de argamassa de 60%, obtido experimentalmente. O teor de argamassa utilizado é considerado elevado, porém justifica-se pela grande quantidade de finos na mistura, necessária para se obter um bom acabamento superficial em concretos aparentes.

Foi utilizado, como referência, concreto moldado com cimento Portland branco sem adição de pigmento. Os valores obtidos no ajuste do traço (Tabela 14), estão *plotados* no diagrama de dosagem (constituído por quatro eixos representados pela resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, relação

água/cimento, traço unitário e consumo de cimento) que pode ser visualizado na Figura 10. A partir desse diagrama, foram definidos os traços a serem utilizados, para as relações a/c de 0,40; 0,55 e 0,70 (Tabela 15).

Tabela 14 - resultados da dosagem experimental

Traço unitário 1:m	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	fc (MPa)
1:3,5	0,35	491,0	2378,9	62,92
1:5	0,46	360,0	2327,5	50,32
1:6,5	0,62	291,0	2362,2	36,12

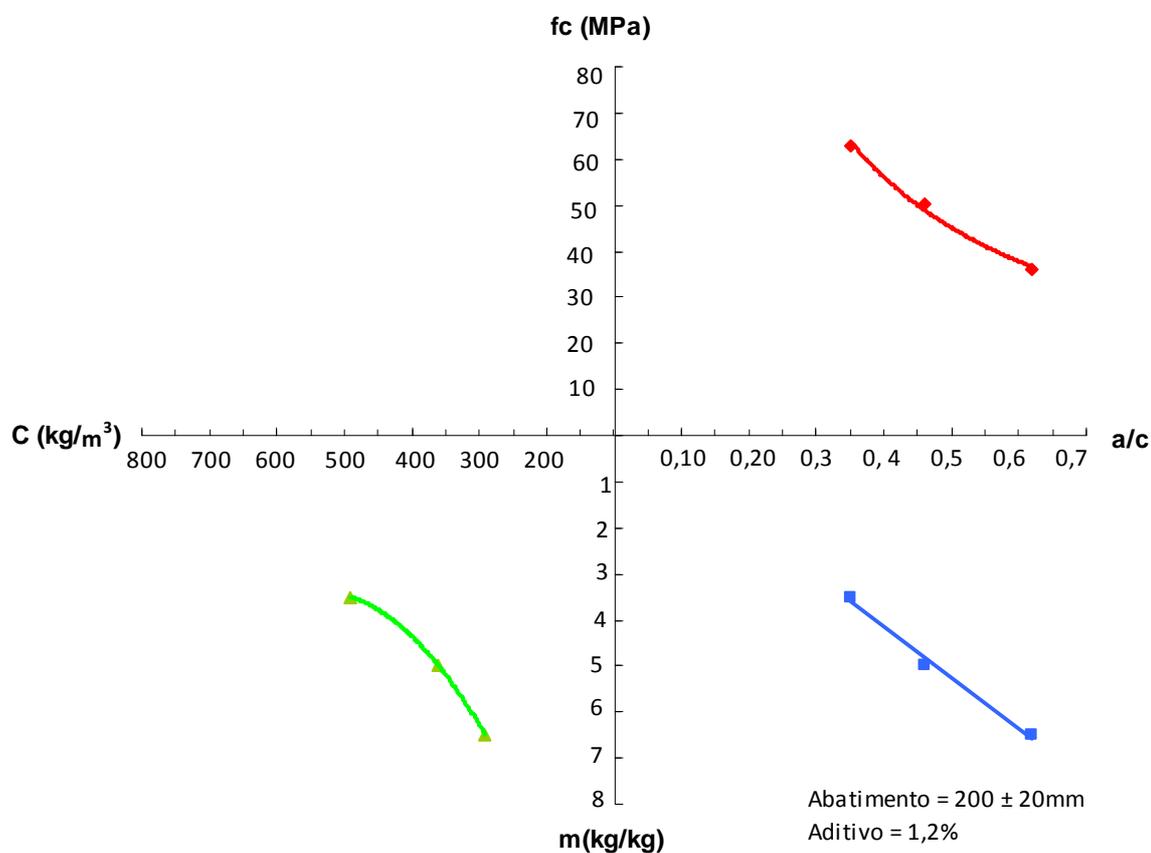


Figura 10 – Diagrama de dosagem do concreto de referência

Tabela 15 – proporcionalamento dos concretos cromáticos

Relação a/c	m	Traço unitário				Consumo de cimento (kg/m³)
		c	f	a	p	
0,40	4,1	1	0,84	1,22	2,04	435,55
0,55	5,9	1	1,29	1,85	2,76	318,92
0,70	7,4	1	1,66	2,38	3,36	263,09

Quantidade de material (kg)								
a/c	cimento	fíler	areia	pedrisco	água	pigmento		
						3%	6%	10%
0,40	12,25	10,29	14,95	25,0	4,90	0,37	0,74	1,23
0,55	9,06	11,68	16,76	25,0	4,98	0,27	0,54	0,91
0,70	7,44	12,35	17,71	25,0	5,21	0,22	0,45	0,74

A quantidade de pigmento a ser adicionada nos traços dos concretos referência (relações a/c 0,40; 0,55 e 0,70) foi compensada pela retirada da mesma quantidade, em massa, de fíler. Tal procedimento julgou-se necessário para que houvesse a manutenção do teor de argamassa.

Eram moldados simultaneamente, para cada traço, os corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão, penetração de íons cloreto, absorção de água por capilaridade, carbonatação e análise colorimétrica.

4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

As misturas dos concretos foram realizadas em betoneira de eixo vertical, previamente limpa e imprimada com argamassa de cimento e agregado miúdo na proporção de 1:3. Os materiais utilizados na imprimação são os mesmos utilizados na produção dos concretos.

A colocação dos materiais na betoneira seguiu sempre a mesma ordem, sendo; brita, 1/3 da água, cimento e pigmento (Figura 11a), 1/3 da água, fíler, ½ do aditivo superplastificante, areia, 1/3 da água e o restante do aditivo. A operação da mistura durou cerca de 4 a 5 minutos, sendo que, após a colocação da última parte do aditivo, manteve-se a mistura em agitação por mais 1 minuto para garantir a máxima eficiência do mesmo.

Foram moldados 17 corpos-de-prova, entre cilíndricos e prismáticos, para cada traço de concreto. O processo de adensamento foi mecânico, com uso de um vibrador de agulha com 25mm de diâmetro.

Como o material das fôrmas exerce um efeito no aspecto final da superfície de concreto, padronizou-se a utilização de fôrmas de compensado resinado para a moldagem dos corpos-de-prova para a análise colorimétrica. A utilização de óleo desmoldante também pode afetar a aparência superficial e, dessa forma, tal procedimento foi excluído.

O controle da trabalhabilidade foi realizado através do ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump*), segundo o procedimento indicado pela NBR (7223/82), como ilustra a Figura 11b. O valor do abatimento e outras características de cada concreto podem ser visualizados no Anexo 1 deste trabalho.



Figura 11 – (a) Mistura dos materiais; (b) Abatimento de tronco de cone (*Slump*)

Após as concretagens, os corpos-de-prova foram cobertos com lonas plásticas, permanecendo nas fôrmas por 24 horas (Figura 12a). Após, foram desmoldados e colocados na câmara úmida (Figura 12b) com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa superior a 95%. Lá permaneceram por 28 dias. Para evitar um possível manchamento da superfície do concreto, através da condensação de água sobre o material, utilizou-se o mesmo procedimento adotado por Passuelo (2004), envolvendo os corpos-de-prova destinados à análise da cor em panos de algodão previamente umedecidos antes da colocação dos mesmos na câmara úmida.



Figura 12 – (a) Corpos-de-prova após a concretagem; (b) Cura dos corpos-de-prova

4.5 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.5.1 Resistência à compressão axial

Para verificar o comportamento mecânico dos concretos feitos com os diferentes tipos de pigmentos nas diversas proporções, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 9,5x19,5 cm, sendo ensaiados à compressão simples, seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT,1994).

Com o objetivo de avaliar o comportamento da resistência ao longo do tempo, adotaram-se três idades de ruptura dos corpos-de-prova, que são 7, 14 e 28 dias. Foram moldados três corpos-de-prova para cada idade de ruptura, totalizando nove cp's cada combinação da matriz experimental.

4.5.2 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio, proposto por Kelhan (1988), consiste em monitorar, ao longo do tempo, o acréscimo de massa aparente de um corpo-de-prova submerso em água até atingir constância de massa, permitindo determinar a Taxa de penetração de água e a resistência capilar.

Apesar de não normalizado, este ensaio tem-se mostrado eficiente para avaliar a absorção de água no concreto, sendo o método relatado e detalhado em

diversos trabalhos científicos, tais como Moura (2000), Masuero (2001); Kulakowski (2002), Kirchheim (2003), entre outros.

Conforme o procedimento do ensaio, inicialmente foram confeccionados 2 corpos-de-prova prismáticos de dimensões de 10x10x20 cm, para cada combinação da matriz experimental.

Aos 28 dias, os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida, marcados e posteriormente serrados, com o auxílio de uma serra de corte diamantada de forma a obter novos corpos-de-prova de dimensão de 10x10x2,5 cm (Figura 13).



Figura 13 – (a) Corpo-de-prova antes de ser serrado; (b) Corpos-de-prova após serem serrados

Os corpos-de-prova foram deixados em ambiente de laboratório por cerca de uma hora, para perder parte da água absorvida na serragem. Após este período foram pesados e colocados em estufa a 70 ± 2 °C até a constância de massa (definida como 0,1% da massa, entre pesagens de aproximadamente 24 horas).

Uma vez secos, foram tomadas as medidas da espessura e da área que ficaria em contato com a água, as quais são necessárias para a determinação da taxa de absorção e resistência capilar.

Tomadas as medidas e resfriados, os mesmos foram embalados em sacos plásticos e colocados em recipientes fechados com sílica gel por cerca de 30 dias, até a data da realização do ensaio.

As laterais do corpo-de-prova (face 10x2,5cm) foram seladas com resina epóxi, e também, na face oposta àquela a ser ensaiada, que é a face em contato com a

fôrma, foi acoplada uma tampa constituída por uma placa de PVC com uma mangueira de 5 mm de diâmetro no centro, com a função de fazer contato com a atmosfera e garantir o equilíbrio de pressão entre a atmosfera e o espaço entre a superfície do corpo-de-prova e a placa. O esquema de preparação do corpo-de-prova pode ser visto na Figura 14.

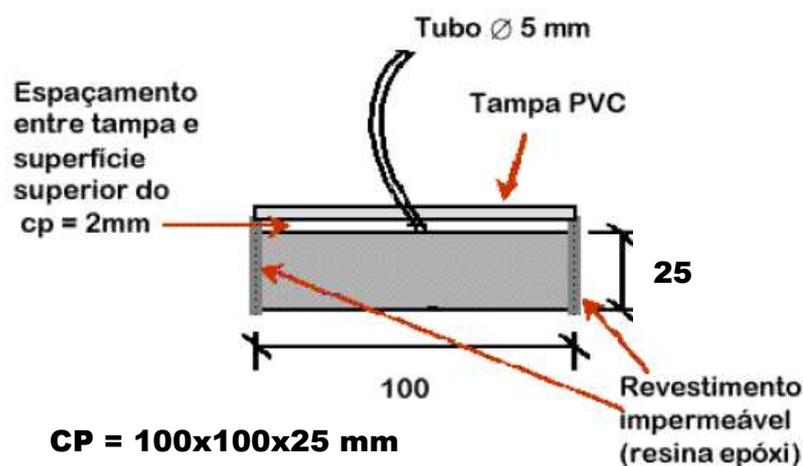


Figura 14 – Representação esquemática de preparação do corpo-de-prova para o ensaio de absorção [adaptado de Kulakoski, 2002]

O ensaio teve início o mais próximo possível do término do preparo dos corpos-de-prova. Na impossibilidade, os mesmos foram dispostos em uma estufa a baixa temperatura (40 ± 2 °C), para não absorver umidade.

O corpo-de-prova, devidamente preparado, foi colocado em imersão em uma caixa com água, cujo nível é mantido constante durante o ensaio, monitorando-se a massa nos tempos estabelecidos: 2, 5, 10, 15 e 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72 e 96 horas.

Uma vez iniciado o ensaio, o corpo-de-prova não pode ser removido da água.

Os valores da massa determinados ao longo do ensaio e do acréscimo acumulado de massa são plotados em gráficos em função da raiz quadrada do tempo. Assim, observam-se duas fases distintas, para as quais é possível interpolar duas retas. A primeira atribui-se à absorção inicial de água e a segunda à saturação. A intersecção dessas duas retas é denominada ponto de saturação ou *nick point*.

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. A resistência capilar é obtida pelo quadrado do valor da abscissa do *nick point* dividido pela espessura do corpo-de-prova, conforme apresentado na Equação 1.

$$R = \left(\frac{t_{cap}}{e} \right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R = resistência capilar (h/m²);

t_{cap} = abscissa do "nick point" (h^{1/2});

e = espessura do corpo-de-prova (m);

4.5.3 Carbonatação acelerada

Para o ensaio de carbonatação foram utilizados 4 corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm para cada combinação da matriz experimental. As fôrmas foram envolvidas em um filme plástico, evitando assim a interferência do desmoldante nos resultados.

Diversos trabalhos (Abreu, 2004; Kirchheim, 2003; Kulakowski, 2002, entre outros) realizados no NORIE utilizaram uma câmara específica para a etapa de sazonalidade. Esta câmara consiste em uma caixa de chapas compensadas com tampa, onde força-se a circulação do ar em seu interior. Nessa circulação, o ar passa por uma solução de hidróxido de potássio, onde o CO₂ contido no ar é retido.

Porém, segundo Pauletti (2004), neste sistema de sazonalidade a umidade das amostras seria equilibrada apenas entre as amostras, e não com a umidade da sala em condições controladas, que é o propósito do sistema. Dessa forma, a autora decidiu abandonar o uso da câmara de sazonalidade e realizar toda a secagem na sala climatizada.

Assim como no trabalho de Pauletti (2004), a secagem dos corpos-de-prova foi realizada em uma câmara climatizada com umidade relativa de 70± 2 % e

temperatura de 20 ± 2 °C, e suas massas monitoradas até a constância de massa (diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas).

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em uma câmara (Figura 15) com 6% de CO_2 , que é a mesma utilizada por Kulakowski (2002), Abreu (2004) e Pauletti (2004). A câmara permanece em sala climatizada com temperatura e umidade relativa controlada durante todo o ensaio.

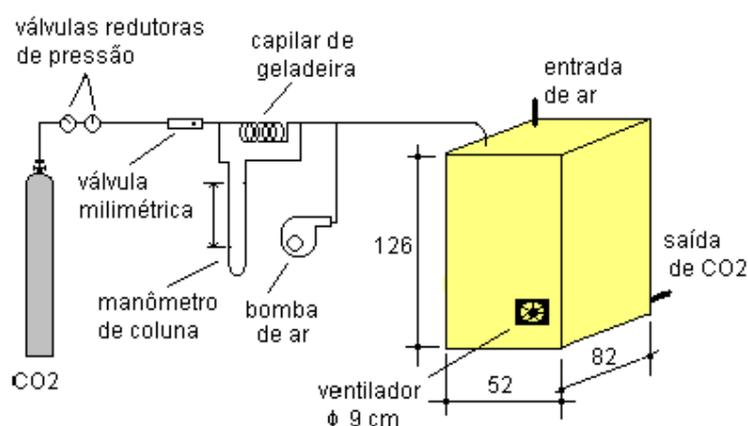


Figura 15 – Esquema da câmara de carbonatação a 6% de CO_2 [Abreu, 2004]

A evolução da frente de carbonatação foi medida aos 14, 28, 91 e 120 dias. A menor idade foi adotada em virtude de se trabalhar com um traço mais pobre, com relação a/c alta, e assim, com alta possibilidade de carbonatação a baixas idades. Inversamente, a idade de 120 dias foi adotada em função do traço 1:4,1. O número de idades foi limitado pela dimensão do corpo-de-prova.

Antes da câmara ser aberta para retirada dos corpos-de-prova, a alimentação de CO_2 é interrompida. A cada medição, depois de aberta a câmara, as amostras são identificadas e dessas, são retiradas fatias de cerca de 40 mm.

Sobre as fatias recém fraturadas, é aspergida solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em 70 % de álcool etílico e 30% de água destilada. Deve-se ter cuidado para que a superfície fraturada não esteja molhada ou apresente excesso de poeira, evitando erros de leitura. Ao término, o restante do corpo-de-prova é colocado novamente na câmara e reiniciada a alimentação.

Conforme recomendado por Kulakowski (2002), foi feita a documentação fotográfica das fatias rompidas para poder realizar e conferir as medidas quantas vezes fossem necessárias, e permitir realizar diversas medidas por face. A determinação da profundidade de carbonatação é feita com um paquímetro digital, onde são lidos doze pontos (Figura 16) preestabelecidos e anotando os valores lidos em uma planilha.

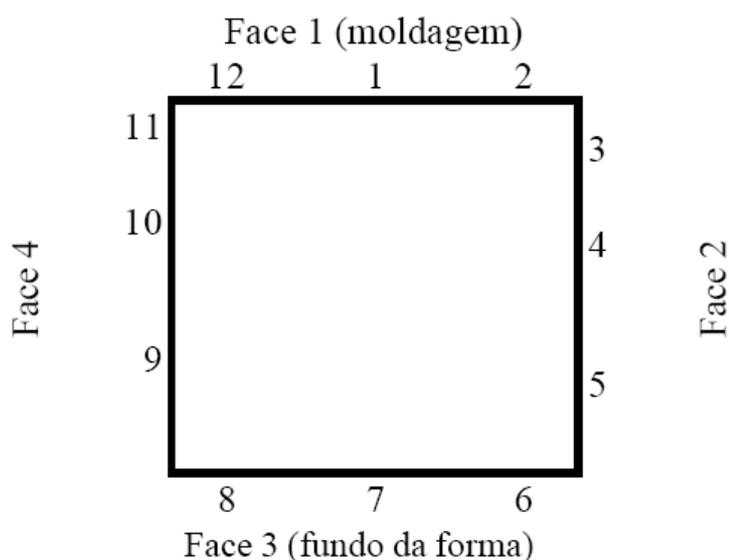


Figura 16 – Identificação dos pontos de leitura para o ensaio de carbonatação [Fonte: Kirchheim, 2003]

4.5.4 Penetração de íons cloreto

Este ensaio foi realizado segundo *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM C 1202-92), que indica a resistência do concreto à penetração de cloretos.

Este método, segundo Pererira (2001), tem sofrido críticas por elevar a temperatura, devido à geração de calor proveniente da alta voltagem (60V), provocando um aquecimento das soluções e do corpo-de-prova (efeito Joule), o que modifica a velocidade do fluxo dos íons; e por não distinguir o fluxo de cloretos das demais reações que ocorrem simultaneamente.

Outro fator importante a ser considerado é que, quando o disco de concreto é introduzido na célula, antes da aplicação de qualquer campo elétrico, já se tem

difusão, principalmente pelos íons hidroxila (OH⁻), devido à sua alta mobilidade. E quando o campo elétrico é aplicado existe a migração de todos os íons na direção do eletrodo de sinal oposto, ocorrendo difusão e migração simultaneamente. Além disso, os íons cloretos, quando passam pelo concreto, podem reagir com o C₃A e, com isto, o fluxo estacionário não poderia ser alcançado até o término da reação (ANDRADE, 1993).

Apesar das críticas atribuídas ao método, alguns pesquisadores afirmam que o teste reflete a penetração dos cloretos do concreto (MONTEIRO citado por KULAKOWSKI, 1994), sendo largamente utilizado. Deve-se salientar que as vantagens do ensaio são relativas à fácil e rápida execução, além de poder ser aplicado em quase todos os tipos de concreto.

O ensaio especificado pela ASTM 1202/92 consiste em acoplar um corpo-de-prova cilíndrico de 9,5 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, entre duas meias células de acrílico, uma delas contendo hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1,2%, e a outra contendo solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração. Entre as células é gerada uma diferença de potencial de 60 V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir no concreto. Através de um amperímetro, a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos.

A duração do ensaio, propriamente dito, é de seis horas, e o produto da corrente passante pelo tempo, expresso em Coulomb, indica a carga total que atravessa o corpo-de-prova e revela a menor ou maior resistência do concreto à penetração do íon cloreto.

A ASTM C 1202-92 ainda estabelece uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de cloretos, de acordo com a intensidade da corrente, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202-92)

Carga passante (Coulombs)	Penetração de íon cloreto
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Segundo Pereira (2001), cabe ressaltar que esta classificação é apenas qualitativa e serve como um referencial da penetração de cloretos.

Para a realização do ensaio foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 9,5 x 19 cm, dos quais, após 28 dias, foi retirada da parte central uma fatia de 5 cm de espessura por 10 cm de diâmetro, para posterior montagem do ensaio. Uma breve descrição da seqüência do ensaio é feita a seguir:

- após o corte, as fatias foram colocadas em estufa a uma temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingirem constância de massa (0,1% da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas);
- obtida a constância de massa, e após resfriados, os corpos-de-prova foram embalados e colocados em um recipiente vedado com sílica gel, até a data da realização do ensaio;
- para a realização do ensaio, o perímetro do corpo-de-prova as faces foi impermeabilizado com resina epóxi e após a secagem, os corpos-de-prova foram colocados no dessecador e posteriormente, submersas em água deionizada até a saturação;
- decorrido o tempo de saturação, as fatias foram secas superficialmente para serem acopladas às meias células de acrílico por meios de um material selante à base de poliuretano;
- foi montado um circuito fechado (Figura 17) que recebe uma diferença de potencial de 60 V e cada meia célula recebe solução de concentração diferente: uma com solução de hidróxido de sódio (NaOH), e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl);

- a diferença de potencial é aplicada durante 6 horas e a corrente passante pelas células é registrada a cada 30 minutos. O cálculo da carga total passante pelos corpos-de-prova é realizado através da equação:

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + 2 \cdot I_{90} + \dots + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 2}$$

A temperatura da solução de cloreto de sódio é controlada durante o ensaio, pois se esta ultrapassar 90 °C, este resultado deve ser descartado.



Figura 17 – Ensaio de penetração acelerada de cloretos

4.5.5 Análise colorimétrica

Carvalho e Calavera (2002) explicam que, quando se prepara uma mistura de concreto com quantidades crescentes de pigmento, a intensidade da cor aumenta até um ponto de “saturação”, onde a partir do qual o aumento da tonalidade é praticamente nulo. Dessa forma, para conhecer a porcentagem de pigmentação ótima das misturas, a fim de consumir somente a quantidade de pigmento necessária para a obtenção da cor desejada, foi realizada a análise colorimétrica das amostras.

O brilho, a cor e a textura são atributos que permitem caracterizar a aparência de um objeto. A cor é composta pela luminosidade, saturação e tonalidade. Já o brilho e a textura constituem os atributos geométricos, cuja particularidade reside no fato de que sua percepção varia conforme as condições de iluminação e observação (HUNTER e HAROLD, 1987 apud ABITANTE, 2004).

Abitante (2004) explica que a cor é percebida pela reflexão difusa. Esta, por distribuir-se em todas as direções, permite que a mesma cor seja percebida independentemente da posição do observador. O olho humano distingue na forma de cor os comprimentos de onda entre 380nm e 770nm, aproximadamente. Estes caracterizam a parte visível do espectro de ondas eletromagnéticas, o qual abrange desde o infravermelho até o ultravioleta, conforme a Figura 18.



Figura 18 – Espectro visível pelo olho humano (comprimento de onda em nm) [Coelho, 2001]

Os sistemas de avaliação numérica da cor baseiam-se na medida da refletância e normalmente representam-na a partir dos parâmetros tonalidade, saturação e luminosidade. A tonalidade representa a sua especificação geral, mas não indica a concentração, dada pela saturação. A luminosidade compõe o terceiro atributo, variando do branco ao preto. Dado o seu caráter tridimensional, a cor pode ser graficamente representada por um sistema de coordenadas perpendiculares: $L^*a^*b^*$, conhecido como sistema CIE $L^*a^*b^*$ (ABITANTE, 2004).

Este método, também conhecido como CIELAB, é muito utilizado em diversos campos da pesquisa. Segundo Passuelo (2004), "o método foi desenvolvido para garantir uniformidade na representação da cor e tornar as diferenças numéricas na escala de cor mais equivalentes às diferenças da percepção visual".

No sistema $L^*a^*b^*$, as coordenadas $-a^*$, $+a^*$ representam a variação da cor verde ao vermelho, as coordenadas $-b^*$, $+b^*$ representam a variação do azul ao amarelo e o parâmetro L^* corresponde à luminosidade. Este sistema é apresentado graficamente por uma esfera sólida que representa o espaço de cor tridimensional e pode ser visualizado na Figura 19.

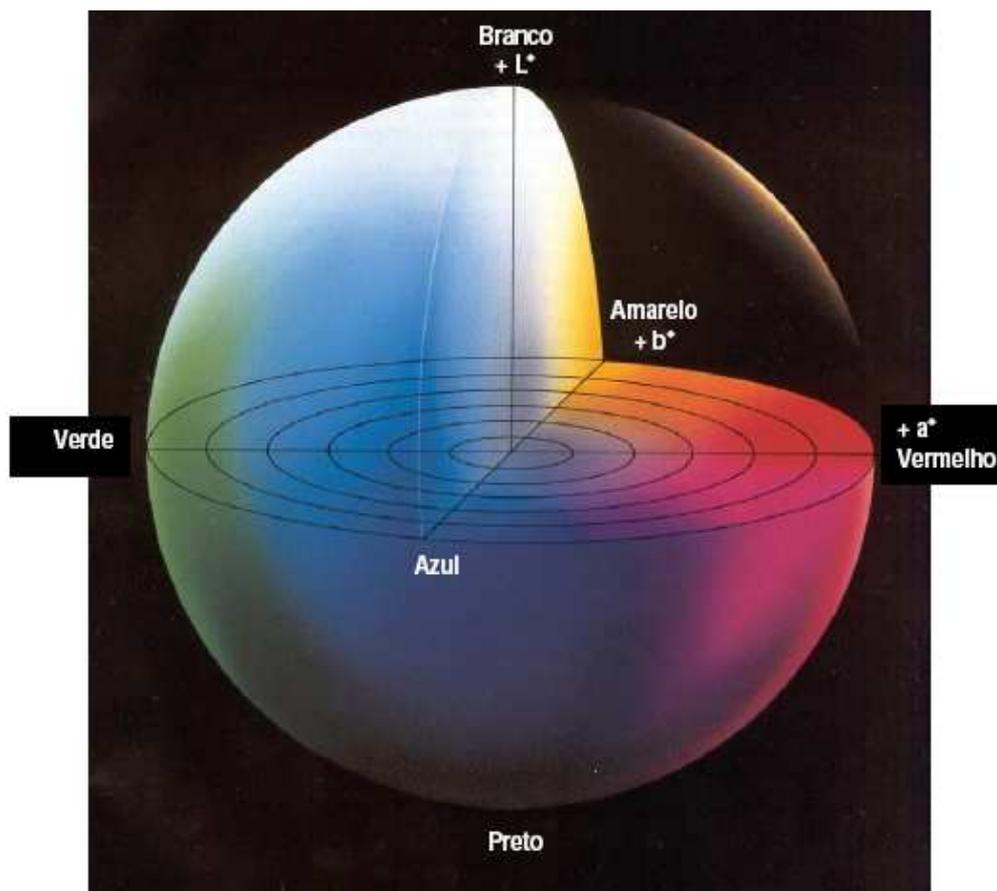


Figura 19 – Representação do sólido de Cor no espaço $L^* a^* b$ [Fonte: Minolta, 1998, apud Abitante, 2004]

A quantificação numérica das diferenças de cor é amplamente difundida no meio técnico e industrial através do parâmetro conhecido como Delta E (ΔE), o qual corresponde à hipotenusa espacial no espaço de cor, em unidade Judd, conforme mostra a equação 2.15, extraída da ASTM D 2244 (1993).

$$\Delta E = \text{raiz}(\Delta L^*2 + \Delta a^*2 + \Delta b^*2) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

ΔL^* = variação de luminosidade, dada por $(L^*1 - L^*0)$;

Δa^* = variação de cromaticidade na direção verde/vermelho, dada por $(a^*1 - a^*0)$;

Δb^* = variação de cromaticidade na direção amarelo/azul, dada por $(b^*1 - b^*0)$.

A diferença total da cor ΔE^* calculada através da Equação 3 é específica para uma variação total de cor, abrangendo todos os eixos da esfera. Para uma análise mais específica sobre a variação da cor, utilizou-se a razão entre eixos L^* (luminosidade) e a^* (vermelho e verde), onde pode-se observar as diferenças diretamente sobre as cores utilizadas (vermelho e verde, forte e fraco).

O equipamento utilizado para a medição dos parâmetros da cor foi um espectrofotômetro da marca Minolta, modelo CM 2600D. A metodologia para realização dos ensaios seguiu as recomendações da norma americana ASTM D 2244/84 – *Standart test method for caulculation of colour differences from instrumentally measured colour coordinates*, sendo as análises colorimétricas feitas através dos parâmetros L^*a^*b .

Para a realização deste ensaio, houve um cuidado especial com a produção, moldagem, cura e armazenamento das amostras de concreto. Segundo Passuelo (2004), as possibilidades dos resultados sofrerem interferências de fatores externos são inúmeras, tendo em vista que se estará trabalhando com a análise da cor na superfície do concreto.

Foram moldados dois corpos-de-prova, nas dimensões de 10x10x30 cm, para cada combinação da matriz experimental, totalizando 48 corpos-de-prova no final das concretagens.

Após os 28 dias de cura, e até a data da realização dos ensaios, cerca 90 dias, os corpos-de-prova permaneceram em uma câmara de sazramento com umidade relativa (70 ± 2 %) e temperatura (20 ± 2 °C) controladas.

5 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como as considerações a respeito dos mesmos. A apresentação dos itens que constituem este capítulo é feita sob a forma de tabelas e gráficos, para cada ensaio, seguido de uma análise de significância estatística com o auxílio do programa Statistica 5.0.

Em função das características particulares de cada ensaio, utilizou-se a regressão múltipla linear para a análise estatística dos efeitos e das interações existentes entre os fatores controláveis, obtendo equações ajustadas de cada modelo testado, bem como os parâmetros da análise de variância e os valores de R^2 (ou coeficiente de determinação) de cada análise. O programa Statgraphics Plus foi usado para análise de regressão linear.

A análise estatística dos resultados obtidos permitiu obter modelos matemáticos que representam o comportamento do concreto de cimento Portland branco com e sem adição de pigmentos, quanto às propriedades relacionadas com a durabilidade (carbonatação, penetração de íon cloreto e absorção de água) e resistência à compressão axial. Dessa forma foi possível analisar a tendência de comportamento do material.

Os gráficos de comportamento apresentados neste capítulo foram elaborados considerando sempre os pontos centrais do projeto experimental, por exemplo, quando a variável analisada era a idade, as outras variáveis foram fixadas em relação a/c 0,55 e 6% de adição de pigmento.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados obtidos para cada tipo de pigmento foram modelados através de regressão múltipla linear, sendo que estes foram plotados em gráficos para facilitar a visualização dos dados observados e calculados pelo modelo.

Nas Tabelas 17 a 120 apresentam-se a análise de variância do modelo e os parâmetros calculados para os fatores analisados com os dois tipos de pigmentos estudados.

Tabela 17 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento vermelho (fc)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	13,7128	1,6102	- 8,5161	0,0000
1/ac	24,7443	0,8091	30,5822	0,0000
idade	0,4552	0,0894	5,0871	0,0000
teor	0,2717	0,0691	3,9298	0,0002
idade*ac	- 0,3513	0,1579	- 2,2244	0,0283
exp(teor)/idade	- 0,0009	0,0002	- 3,2054	0,0018

Tabela 18 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (fc)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	15404,2	5	3080,83	922,00	0,0000
Residual	340,828	102	3,34145	-	-
Total	15745,0	107	-	-	-

Tabela 19 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento verde (fc)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	-13,6947	1,14872	-11,9217	0,0000
1/ac	26,5499	0,5739	46,2594	0,0000
1/idade	-22,7866	7,3986	-3,07985	0,0027
teor	0,28116	0,0893	3,14562	0,0022
idade/ac	0,0841	0,0192	4,37832	0,0000
teor/ac ²	-0,0481	0,0216	-2,22232	0,0286

Tabela 20- parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (fc)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	15356,6	5	3071,33	1627,81	0,0000
Residual	181,131	96	1,88678	-	-
Total	15537,8	101	-	-	-

Se valor de p < 5%: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

Onde,

F = teste F, valor calculado

p = nível de significância associado ao valor calculado de F

SQ = soma dos quadrados

GDL = graus de liberdade

MQ = média dos quadrados

Na análise de variância dos modelos e da regressão múltipla linear, o valor de p menor que 0,05 indica que a relação entre as variáveis apresenta significância estatística a um nível de confiança de 95%.

Através do ajuste por regressão múltipla linear dos resultados de resistência à compressão foram encontradas, para os pigmentos utilizados, as seguintes equações (Equações 4 e 5):

$$f_c \text{ (vermelho)} = -13,7128 + 24,7443 \cdot 1/ac + 0,455284 \cdot \text{idade} + 0,2717 \cdot \text{teor} - 0,3513 \cdot \text{idade} \cdot ac - 0,0009 \cdot \exp(\text{teor})/\text{idade} \quad (R^2=97,72\%) \quad \text{Equação 4}$$

$$f_c \text{ (verde)} = -13,6947 + 26,5499 \cdot 1/ac - 22,7866 \cdot 1/\text{idade} + 0,2811 \cdot \text{teor} + 0,0841 \cdot \text{idade}/ac - 0,0481 \cdot \text{teor}/ac^2 \quad (R^2 = 98,77\%) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ac = relação água/cimento

Pode-se considerar que os valores de R^2 obtidos para a modelagem da resistência à compressão são elevados, significando que no mínimo 97% da variabilidade dos dados obtidos no ensaio de resistência é explicada pelo modelo. Os valores obtidos e os valores calculados através do modelo para resistência à compressão estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - valores médios obtidos e calculados para o pigmento Vermelho (MPa)

7 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	51,13	50,98	50,84	49,91	50,35	51,16	51,93	50,20
	0,55	32,01	34,88	36,40	35,06	33,11	33,92	34,69	32,10
	0,70	20,28	24,11	24,01	22,12	23,10	23,91	24,68	22,95
14 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	54,70	55,92	51,63	51,74	52,55	53,37	54,16	53,84
	0,55	36,55	36,07	38,78	37,67	34,95	35,76	36,55	36,23
	0,70	23,19	24,48	26,48	24,03	24,57	25,38	26,17	25,85
28 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	56,64	55,25	56,24	59,02	56,96	57,78	58,58	58,96
	0,55	39,17	42,03	41,22	43,52	38,61	39,43	40,23	40,61
	0,70	26,10	28,71	29,53	27,64	27,50	28,31	29,11	29,50

Tabela 22 - valores médios obtidos e calculados para o pigmento Verde (Mpa)

7 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	51,13	50,82	48,26	52,02	50,90	50,84	50,78	50,70
	0,55	32,01	34,35	33,59	34,97	32,39	32,76	33,12	33,61
	0,70	20,28	22,31	22,97	23,43	21,82	22,37	22,92	23,65
14 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	54,70	52,90	52,87	53,80	54,00	53,94	53,88	53,80
	0,55	36,55	37,38	37,28	36,31	35,09	35,46	35,82	36,31
	0,70	23,19	24,12	25,16	23,77	24,29	24,84	25,39	26,12
28 dias		fc Obtido (MPa)				fc Calculado (MPa)			
		0%	3%	6%	10%	0%	3%	6%	10%
a/c	0,40	56,64	57,10	56,05	58,00	57,75	57,69	57,64	57,56
	0,55	39,17	41,78	39,95	39,99	38,61	39,43	40,23	40,61
	0,70	26,10	26,26	27,39	27,93	26,78	27,33	27,88	28,61

Analisando os modelos ajustados percebe-se a boa correlação com os resultados médios obtidos no ensaio.

Alguns pesquisadores (Fonseca e Nunes, 1998; Hamad, 1995; Benitez, 2002; Kirchheim, 2003) já realizaram estudos sobre o comportamento mecânico dos concretos de cimento Portland branco e, de uma forma geral, esses concretos apresentam características mecânicas semelhantes às dos concretos produzidos com cimento Portland convencional. As Figuras 18 a 23 apresentam as curvas de comportamento dos concretos à base de cimento Portland branco e pigmentos inorgânicos, a partir dos valores calculados nos modelos e também os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

A Figura 20 apresenta o efeito isolado da relação a/c na resistência à compressão, considerado significativo na análise apresentada nas Tabelas 17 a 20.

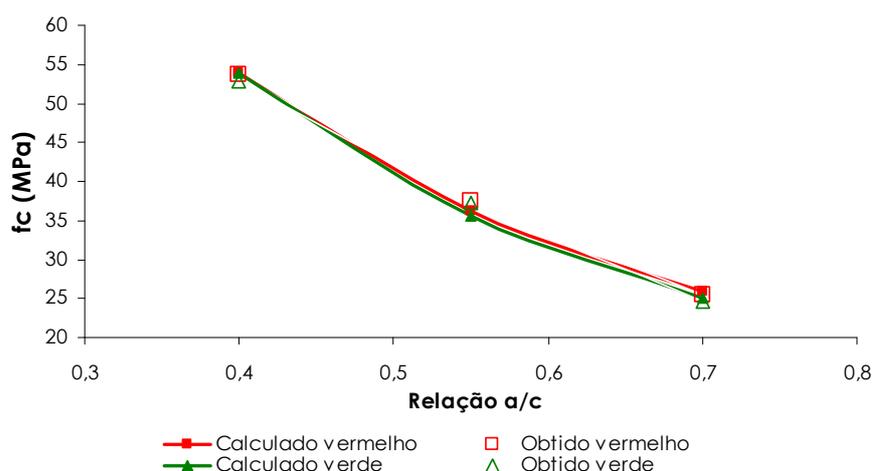


Figura 20 – Resistência à compressão em função do efeito isolado da relação a/c

Nota-se que, como já era esperado, a resistência à compressão decresce significativamente com o aumento da relação a/c. A resistência à compressão diminui cerca de 30% quando aumenta-se a relação a/c de 0,40 para 0,55 e deste para 0,70. Com o aumento da relação a/c de 0,40 para 0,70 há uma queda de quase 50% nos valores obtidos de resistência à compressão. Esse comportamento já é de consenso no meio acadêmico. Logo, a resistência do concreto depende fundamentalmente desta relação.

É possível, ainda, perceber a semelhança no comportamento dos dois concretos, sendo os valores obtidos com o pigmento verde levemente inferiores, cerca de 2%, ao concreto com pigmento vermelho. Analisando estatisticamente essa diferença de 2%, o efeito isolado do tipo de pigmento na resistência à compressão não é significativo para um nível de significância de 95%.

A Figura 21 mostra o efeito isolado da idade na resistência à compressão do concreto.

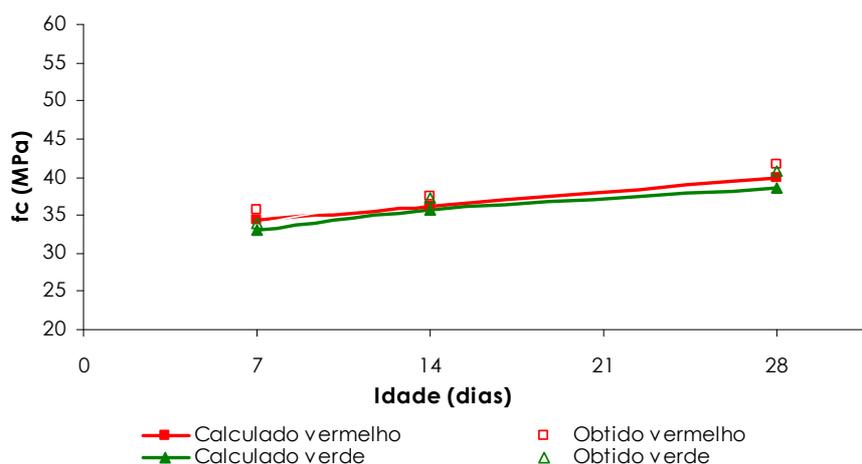


Figura 21 – Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade

Na Figura 21, é possível verificar que o crescimento da resistência com a idade é similar a dos concretos de alta resistência inicial (Kirchheim, 2003), atingindo aproximadamente 80% da resistência final aos 7 dias e 90% aos 14 dias. Este comportamento já é esperado em concretos com cimento Portland branco. Fonseca e Nunes (1995) explicam que a maior finura apresentada por este cimento lhe confere maior resistência mecânica nas primeiras idades.

A Figura 22 apresenta o efeito significativo e isolado do teor de adição na resistência à compressão dos concretos com pigmento verde e vermelho.

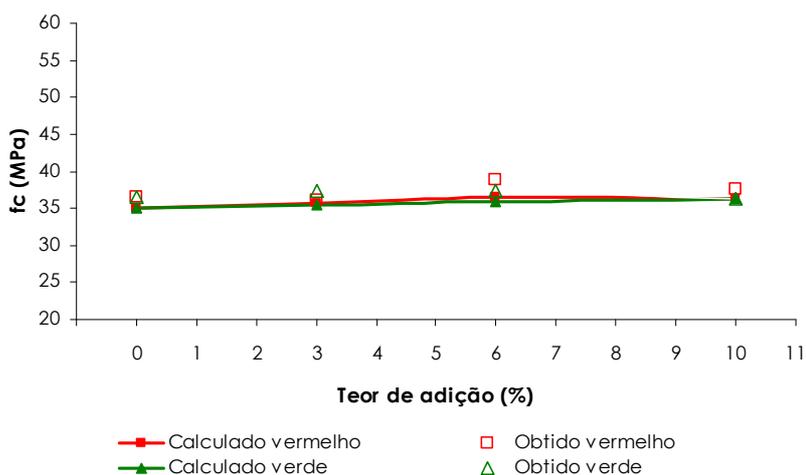


Figura 22 – Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de adição

Analisando isoladamente a influência do teor de adição verifica-se que, apesar de sua significância, a adição de pigmento pouco alterou a resistência à

compressão do concreto. A resistência aumentou cerca de 5% com adição do pigmento vermelho e 2% com a adição do pigmento verde.

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam as interações significativas entre a relação a/c, idade e teor de adição na resistência à compressão do concreto.

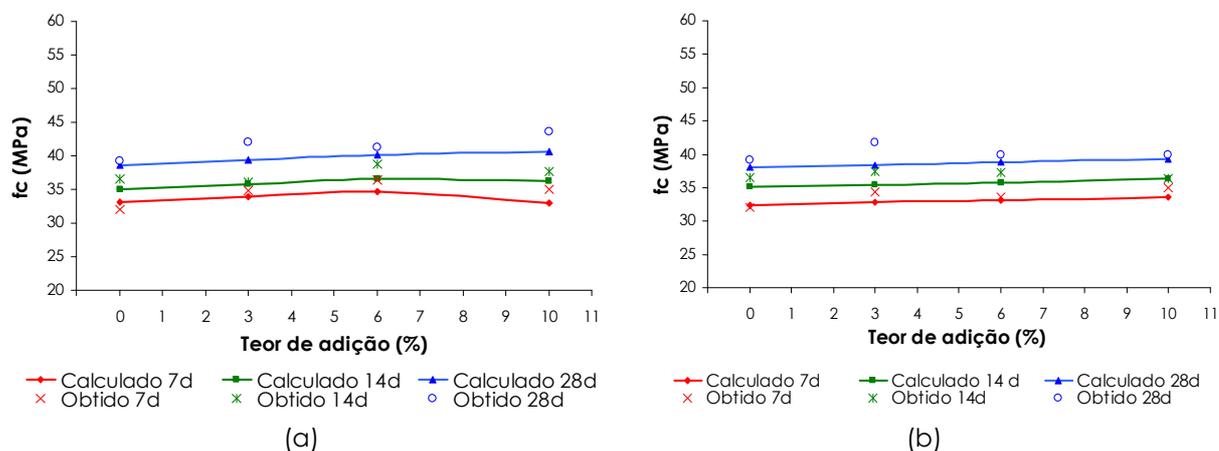


Figura 23 – Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e a idade; (a) pigmento vermelho; (b) pigmento verde.

Pode-se notar que para cada idade do concreto a adição do pigmento apresenta um efeito diferenciado na resistência à compressão. Esse efeito pode ser melhor visualizado no concreto com pigmento vermelho, onde há um ganho de cerca de 9% na resistência à compressão aos 7 dias com adição de 6% de pigmento, já com 10% de adição nota-se uma tendência de queda, porém com valores cerca de 4%, 3% e 7,5 % superiores aos valores do traço referência, respectivamente aos 7, 14 e 28 dias. Para o pigmento verde, a resistência à compressão aumenta à medida que se adiciona quantidades crescentes de pigmento, fato que, provavelmente, esteja ligado à forma e ao diâmetro médio das partículas. Com relação ao traço referência o ganho de resistência com 10% de adição é cerca de 6%, 1,5% e 3% aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Na Figura 24 observa-se a interação significativa entre a relação a/c e a idade na resistência à compressão do concreto.

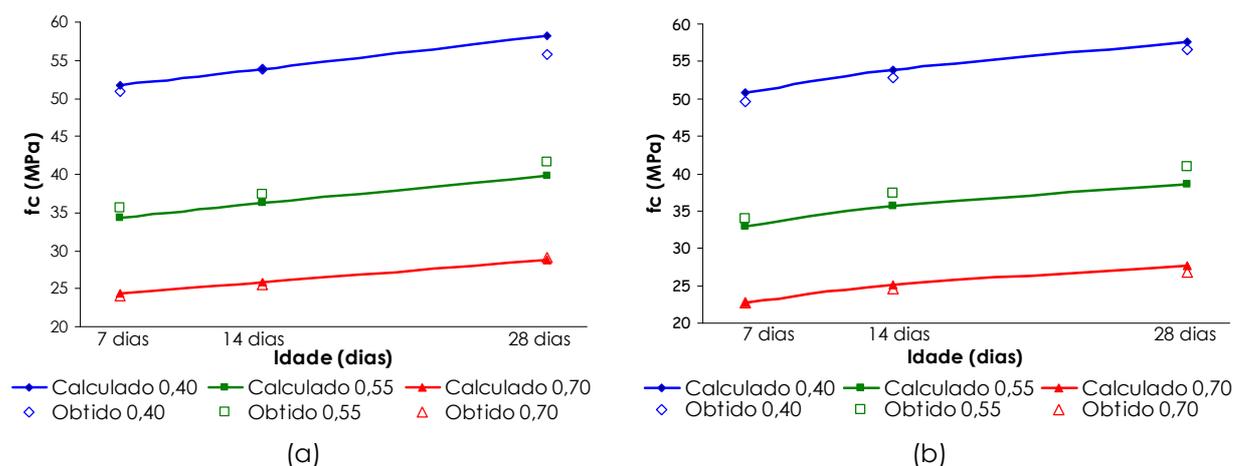


Figura 24 – Resistência à compressão em função da interação entre a relação a/c e a idade; (a) pigmento vermelho e (b) pigmento verde

Nota-se que a resistência dos concretos com relação a/c 0,40, 0,55 e 0,70 cresce de forma diferenciada com a idade, ou seja, o concreto com pigmento vermelho de relação a/c 0,40, aos 7 dias, possui cerca que 89% da resistência dos 28 dias, enquanto que para as outras duas relação a/c, a resistência aos 7 dias é de 85% da resistência dos 28 dias. No concreto com pigmento verde essa diferença é mais acentuada, os ganhos de resistência para as relação a/c 0,40, 0,55 e 0,70, aos 7 dias, se dá de forma diferenciada apresentando, respectivamente, 89, 85 e 82 % da resistência dos 28 dias.

A interação entre a relação a/c e a idade apresenta-se de forma bastante semelhante para os dois pigmentos. Na Figura 24 fica clara a relação de Abrams, em que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c, e também as maiores resistências nas maiores idades, tendência já esperada e já conhecida dentro da tecnologia do concreto, onde quanto maior o tempo de cura, melhores as condições para que se atinjam as propriedades do concreto através das reações de hidratação do cimento.

Na Figura 25, a interação significativa entre a relação a/c e o teor de adição, mostra que dependendo da relação a/c o efeito da adição de pigmentos é diferenciado na resistência à compressão.

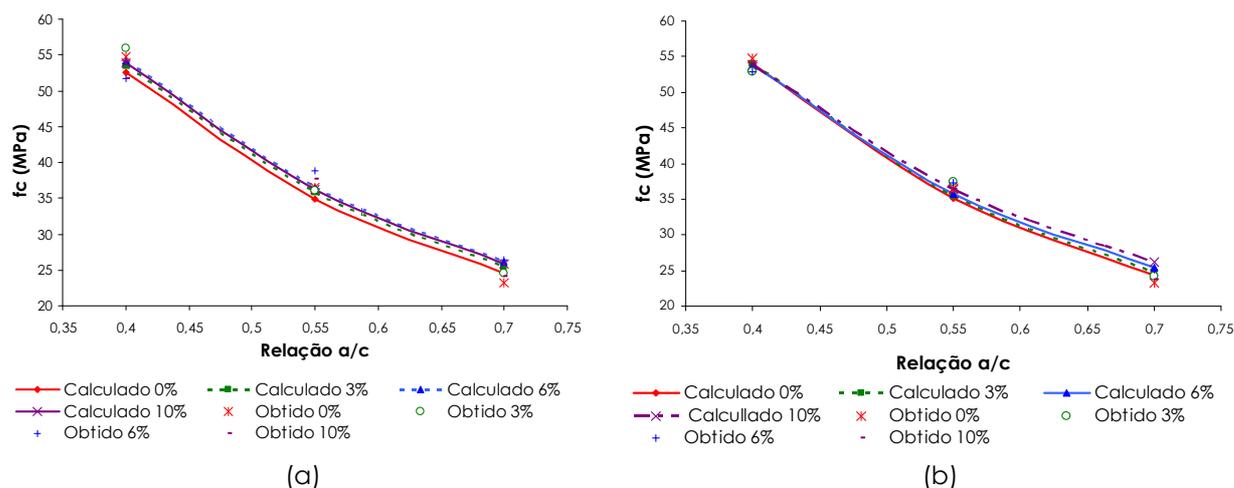


Figura 25 – Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e a relação a/c; (a) pigmento vermelho; (b) pigmento verde

O concreto referência (0% de adição) apresentou resistência inferior à dos concretos com adição de pigmento nas três relações a/c. Pode-se também afirmar que as maiores resistências atingidas com o pigmento vermelho se dão com 6% de adição. Isso, provavelmente, se deve à finura do grão, que até 6% consegue preencher bem os vazios do concreto.

Nos concretos moldados com o pigmento verde, a influência da adição do pigmento pode ser melhor observada para relações a/c elevadas (0,70). A adição de até 10% desse pigmento ainda é benéfica para o concreto, principalmente para altas relações a/c. O pigmento verde, assim como o vermelho, apresenta diâmetro médio inferior ao do grão de cimento, onde o efeito fíler apresentado por estes favorecem o fechamento dos poros.

Estes resultados estão em consenso com os resultados obtidos por outros pesquisadores (Costa et al., 2004; Hendges et al., 2004; Alencar et al., 2005) que avaliaram a resistência à compressão de concretos com adição de pigmentos. O autores concluíram que, de uma forma geral, a adição de pigmento nas proporções utilizadas, variação de 1,1 à 8% sobre a massa de cimento, não alterou a resistência à compressão dos concretos.

Nessas condições, pode-se afirmar que concretos com adição de pigmentos obtiveram um pequeno, porém significativo, incremento na resistência à compressão, possivelmente associado a um efeito físico, que devido a sua alta finura promove um refinamento na estrutura dos poros. Cabrera e Bonavetti (1998)

explicam que os materiais finos podem alojar-se entre os grãos de clínquer promovendo melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura.

Com vistas a observar a microestrutura e a morfologia dos concretos com pigmentos, foram retiradas amostras de concretos com relação a/c 0,55 e teor de adição de 6% de pigmento vermelho e verde, as quais foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e comparados com o concreto referência também com relação a/c de 0,55. A Figura 26 ilustra a formação dos cristais e a densificação da zona de transição desses concretos.

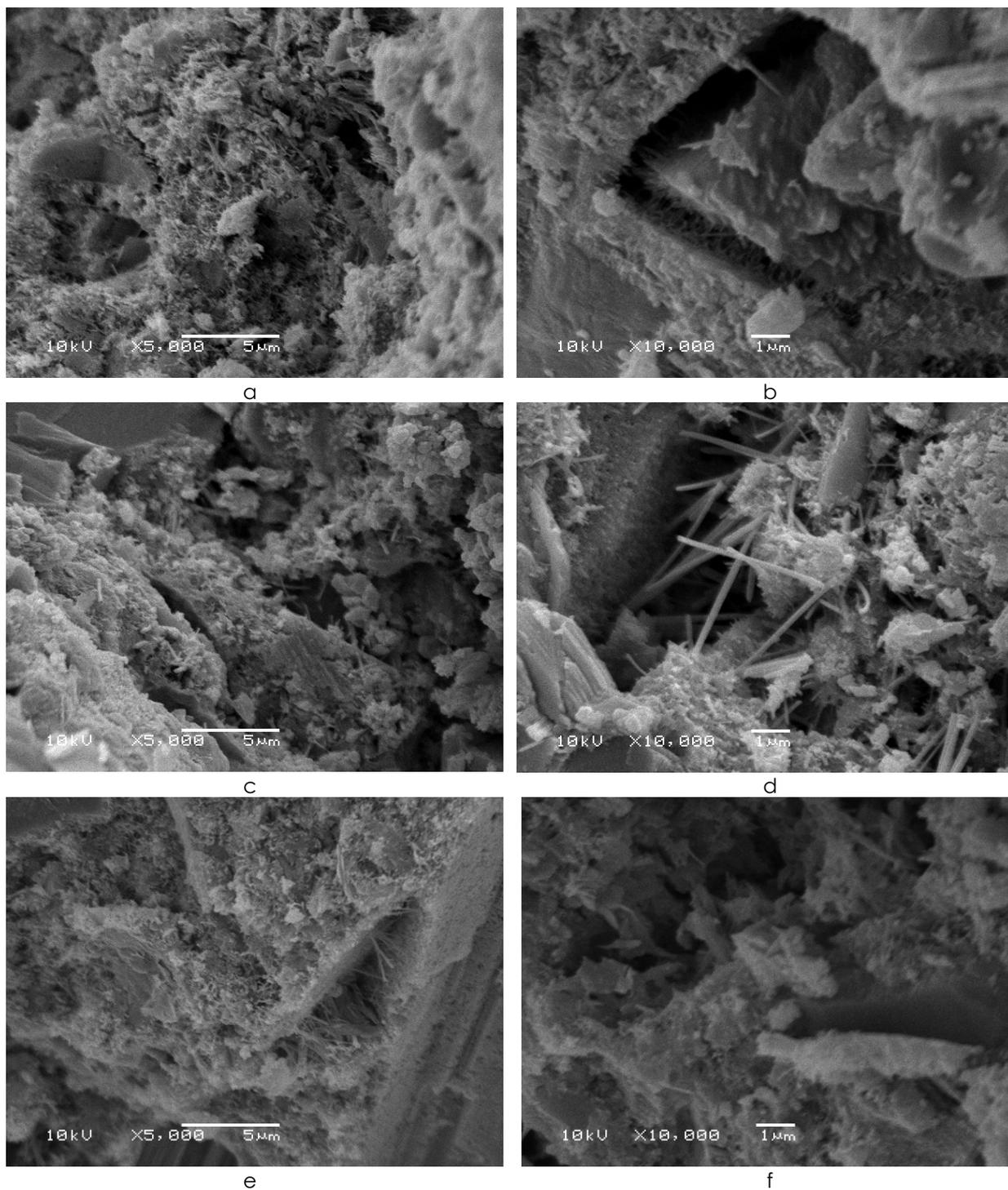


Figura 26 – (a) e (b) MEV concreto referência; (c) e (d) MEV concreto com pigmento vermelho; (e) e (f) MEV concreto com pigmento verde.

Em função das poucas fotos obtidas e em locais muito específicos, não é possível comprovar qualitativamente a maior ou menor densificação da zona de transição dos concretos com os pigmentos verde e vermelho, em relação ao concreto referência. Outro fator que dificultou a análise das imagens é devido a baixa variabilidade encontrada nos resultados obtidos desses concretos

Na Figura 27 pode-se observar o grão do pigmento verde, sua forma circular de diâmetro $\leq 1\mu\text{m}$ sem cristais de hidratação evidencia o efeito físico apresentado pelos pigmentos no concreto.



Figura 27 – Grão do pigmento verde não hidratado no concreto

5.2 PARÂMETROS DE DURABILIDADE

Como forma de estimar a durabilidade dos concretos de cimento Portland branco com adição de pigmentos, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, penetração acelerada de cloretos e carbonatação.

5.2.1 Absorção de água por capilaridade

Para a análise dos resultados de absorção de água por capilaridade, primeiramente foram retirados os dados espúrios (afastados uma vez o desvio padrão da média), comparando-os com os resultados calculados pelo modelo matemático e traçando uma tendência de valores para todas as combinações.

Os valores obtidos de resistência capilar (R) e da taxa de absorção (S) podem ser visualizados no Apêndice 3 deste trabalho.

Após o tratamento dos dados foi feita a análise de variância (ANOVA) pelo programa Statistica 5.0 para verificar a significância de cada um dos fatores envolvidos. As Tabelas 23 a 26 apresentam os resultados da ANOVA.

Tabela 23 - análise de variância da taxa de absorção com pigmento vermelho

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	0,00119	32,7377	1,38E-05	S
Teor de adição	3	4,66E-05	1,27582	0,326	NS
a/c * teor	6	2,67E-05	0,73076	0,663	NS

Tabela 24 - análise de variância da resistência capilar para o pigmento vermelho

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	6,28E+10	22,2999	9,08E-05	S
Teor de adição	3	7,24E+9	2,5703	0,1081	NS
a/c * teor	6	9,92E+9	3,5229	0,0591	NS

Tabela 25 - análise de variância da taxa de absorção com pigmento verde

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	7,97E-04	17,56588	0,000272	S
Teor de adição	3	8,74E-05	1,926036	0,179244	NS
a/c * teor	6	4,99E-05	1,098702	0,416955	NS

Tabela 26 - análise de variância da resistência capilar para o pigmento verde

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	3,92E+10	11,0887	0,0018	S
Teor de adição	3	1,15E+10	3,2619	0,0593	NS
a/c * teor	6	1,01E+10	2,8642	0,0570	NS

GDL: grau de liberdade MQ: média quadrática F: valor calculado de F
 NS: Valor não significativo S: Valor significativo
 Se valor de p < 5%: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

Partindo da análise de variância, onde o teor de pigmento não foi significativo nos resultados, foi feita a análise de regressão múltipla apenas com a relação a/c (efeito significativo). Através dessa análise foram encontradas as seguintes equações:

$$S_{\text{vermelho}} = -0,19466 + 0,258906 * \exp(ac^3) \quad (R^2 = 88,75\%) \quad \text{Equação 6}$$

$$S_{\text{verde}} = 0,0316326 + 0,047347 * \exp(3 * ac^3) \quad (R^2 = 79,10\%) \quad \text{Equação 7}$$

$$R_{\text{vermelho}} = 2,03452 \text{ E}6 - 487058,0 * \exp(3*ac^3) \quad (R^2 = 91,45\%) \quad \text{Equação 8}$$

$$R_{\text{verde}} = 1,38049\text{E}6 - 5392,12 * \exp(10 *ac^2) \quad (R^2 = 85,48\%) \quad \text{Equação 9}$$

Sendo que:

TA = Taxa de absorção capilar ($\text{g}/\text{cm}^2 * \text{h}^{1/2}$)

R = Resistência capilar (h/m^2)

ac = relação a/c

Pode-se notar que os valores de R^2 obtidos, apesar que representativos (cerca de 85%), são inferiores aos R^2 encontrados para a resistência à compressão. Isso se deve à grande variabilidade encontrada neste ensaio, fato este também encontrado por outros autores que avaliaram a absorção de água por sucção capilar pelo mesmo método, tais como Gonçalves (2000), Masuero (2001) e Reschke (2003).

Os valores obtidos e os valores calculados pelo modelo para a taxa de absorção e resistência capilar estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 27 e 28.

Tabela 27 - valores médios obtidos e calculados para a taxa de absorção (S)

Relação a/c	Teor de pigmento	S ($\text{g}/\text{cm}^2 * \text{h}^{1/2}$) Pigmento vermelho		S ($\text{g}/\text{cm}^2 * \text{h}^{1/2}$) Pigmento verde	
		Obtido	Calculado	Obtido	Calculado
0,40	0%	0,0940	0,0814	0,0940	0,0890
	3%	0,0870		0,0860	
	6%	0,0730		0,0880	
	10%	0,0844		0,0920	
0,55	0%	0,1160	0,1111	0,1160	0,1100
	3%	0,1000		0,1120	
	6%	0,1020		0,0990	
	10%	0,1070		0,1060	
0,70	0%	0,2000	0,1702	0,2000	0,1640
	3%	0,1500		0,1320	
	6%	0,1640		0,1510	
	10%	0,1732		0,1750	

Tabela 28 - valores médios obtidos e calculados para a resistência capilar (R)

Relação a/c	Teor de pigmento	R (h/m ²) Pigmento vermelho		R (h/m ²) Pigmento verde	
		Obtido	Calculado	Obtido	Calculado
0,40	0%	14236,42	14443,66	14236,42	13537,83
	3%	14772,89		13521,95	
	6%	12887,79		12675,19	
	10%	7901,04		13360,04	
0,55	0%	11739,34	12321,99	11739,34	12694,45
	3%	13679,68		13417,52	
	6%	13145,05		14686,26	
	10%	12700,62		11341,46	
0,70	0%	5029,67	6716,02	5029,67	6563,83
	3%	7460,00		10993,57	
	6%	7462,86		8386,63	
	10%	6368,96		6225,97	

Nas Figuras 28 e 29, os valores obtidos e calculados através do modelo podem ser melhor visualizados.

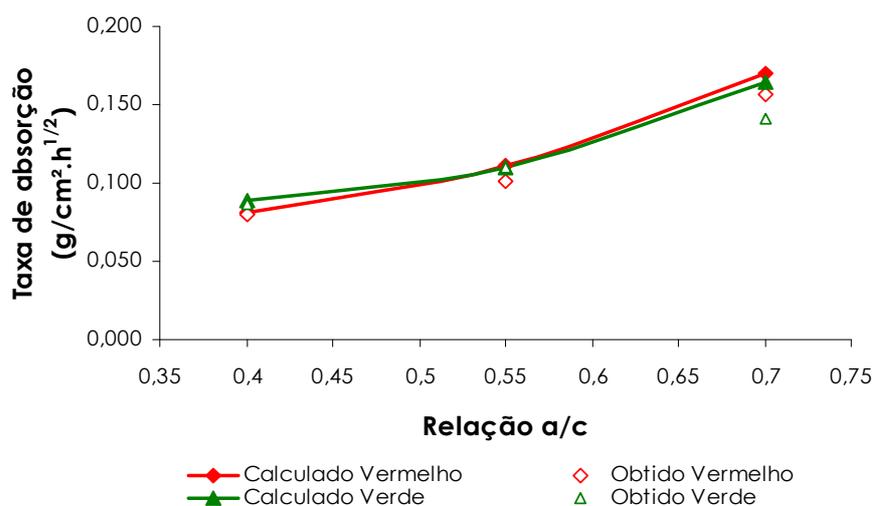


Figura 28 – Taxa de absorção capilar em função do efeito isolado da relação a/c

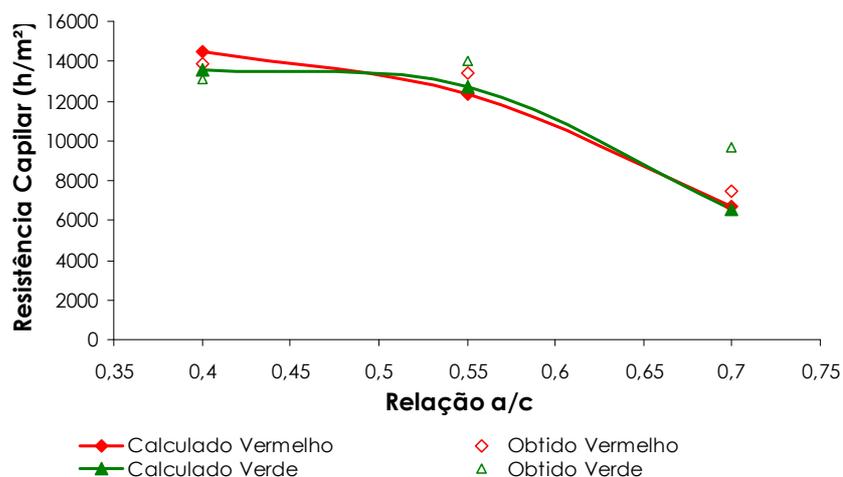


Figura 29 – Resistência capilar em função do efeito isolado da relação a/c

Pode-se observar que a taxa de absorção capilar é inversamente proporcional à resistência capilar e, como já era esperado, quanto maior a relação a/c, maior a taxa de absorção capilar e menor a resistência capilar.

Novamente, percebe-se a semelhança nos resultados obtidos e calculados para os dois pigmentos utilizados. Analisando estatisticamente essa diferença, o efeito isolado do tipo de pigmento sobre a taxa de absorção e resistência capilar não é significativo para um nível de significância de 95%.

Apesar de nesse trabalho apenas serem apresentados gráficos cujas variáveis são estatisticamente significativas, a Figura 30 é apresentada para evidenciar o uso de pigmentos em concretos, mostrando que a adição de pigmentos, principalmente até 6%, tendem a reduzir a absorção capilar e aumentar a resistência capilar.

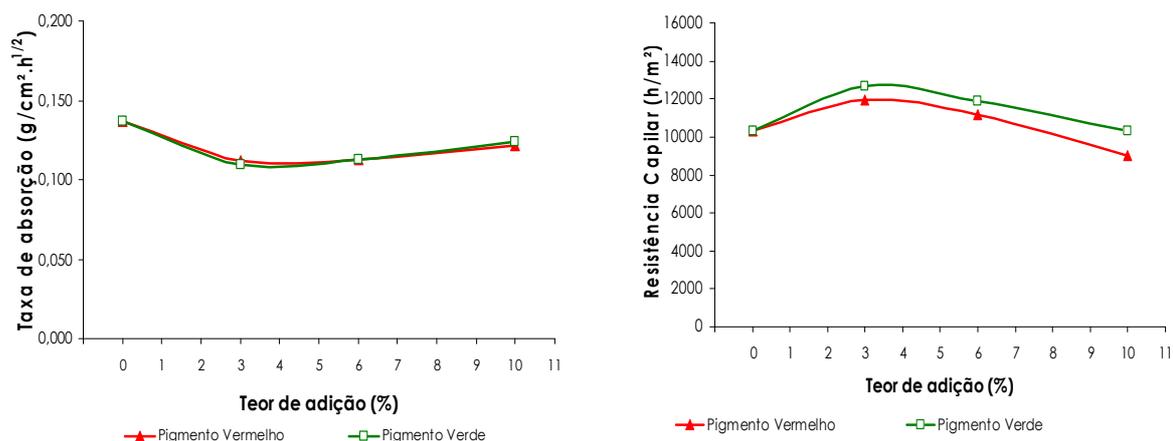


Figura 30 – Resultados médios obtidos de absorção para os pigmentos utilizados

Os resultados encontrados estão em consonância com os obtidos por Gonçalves (2000), onde o autor adiciona resíduo de corte de granito no concreto e observa o efeito fíler do material. O autor explica que a adição de fíler promove um maior refinamento da estrutura devido a sua dispersão na mistura, porém, em quantidades elevadas, há formação de caminhos preferenciais para o movimento ascendente da água, principalmente em pequenas relações a/c. Dal Molin (1995) afirma que uma elevada porcentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da taxa de absorção capilar.

Coelho (2001) analisou a influência da adição dos pigmentos vermelho, amarelo e preto em concretos de cimento Portland composto e branco. O autor verificou o efeito diferenciado da adição de pigmentos sobre os concretos com cimento cinza e branco, onde há um decréscimo na taxa de absorção do concreto cinza com pigmento, e um aumento moderado da taxa absorção nos concretos de cimento branco.

Com base nos resultados apresentados pode-se dizer que a adição de 3 a 6% dos pigmentos vermelho e verde diminuem a absorção de água por capilaridade dos concretos de cimento Portland branco nas dosagens empregadas, embora estatisticamente este fator não tenha sido significativo, provavelmente mascarado em função da variabilidade dos resultados obtidos. Porém, o fator teor de pigmento não é estatisticamente significativo nos resultados frente à influência apresentada pela relação a/c.

5.2.2 Carbonatação acelerada

Por se tratar de corpos-de-prova de concreto, a profundidade de carbonatação em cada face não foi regular. Assim, foram tomadas 12 leituras por corpo-de-prova e posteriormente calculou-se a média e o desvio padrão. Os dados considerados espúrios (afastados uma vez o desvio padrão da média) foram eliminados e em seguida foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para verificar a significância de cada fator controlável. Os dados obtidos durante o ensaio estão apresentados no Apêndice 4 deste trabalho.

De posse dos fatores controláveis considerados significativos, partiu-se para a análise de regressão linear simples, onde foi encontrado para cada pigmento, um modelo que apresenta o comportamento dos materiais frente à profundidade de carbonatação.

Os modelos podem ser visualizados nas Equações 10 e 11.

$$e_{\text{vermelho}} = -24,267 + 0,0759 \cdot \text{idade} + 52,068 \cdot \text{ac} \quad (R^2 = 90,63\%) \quad \text{Equação 10}$$

$$e_{\text{verde}} = -22,998 + 0,1026 \cdot \text{idade} + 48,3937 \cdot \text{ac} \quad (R^2 = 91,25\%) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

ac = relação água/cimento

Id = idade do concreto

As Tabelas 29 a 32 apresentam a análise de variância dos modelos de carbonatação e os parâmetros calculados para os fatores analisados com os dois tipos de pigmentos utilizados no concreto.

Tabela 29 - análise de variância da regressão linear com pigmento vermelho (e)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	-24,2675	1,1408	21,2712	0,0000
idade	0,07591	0,0075	9,9959	0,0000
relação ac	52,0687	1,8468	28,1929	0,0000
teor	-0,0441	0,0611	-0,7217	0,4723

Tabela 30 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (e)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	4397,3994	3	1465,7998	298,4283	0,0000
Residual	451,8792	92	4,9117	-	-
Total	4849,28	95	-	-	-

Tabela 31 - análise de variância da regressão linear com pigmento verde (e)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	-22,9973	1,0767	21,3573	0,0000
idade	0,1026	0,0071	14,3199	0,0000
relação ac	48,3937	1,7431	27,7623	0,0000
teor	0,0727	0,0577	1,2606	0,2106

Tabela 32 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (e)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	4276,6143	3	1425,5381	325,7982	0,0000
Residual	402,5482	92	4,3755	-	-
Total	4679,1625	95	-	-	-

Se valor de $p < 5\%$: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

Onde,

F = teste F, valor calculado

p = nível de significância associado ao valor calculado de F

SQ = soma dos quadrados

GDL = graus de liberdade

MQ = média dos quadrados

Verifica-se que há influência significativa apenas de duas variáveis principais, a relação a/c e a idade dos corpos-de-prova. Na análise de variância dos modelos de carbonatação, o valor de p encontrado, menor que 0,05, indica que a relação entre as variáveis apresenta significância estatística a um nível de confiança de 95%.

Os valores médios observados e o valores obtidos através do modelo para a carbonatação acelerada com os dois pigmentos utilizados estão apresentados nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33 - valores médios obtidos e calculados de profundidade carbonatada para o pigmento vermelho

Idade	Teor (%)	e (mm) – obtido			e (mm) - calculado		
		a/c			a/c		
		0,40	0,55	0,70	0,40	0,55	0,70
14 dias	0	0,00	4,82	8,81	0,00	5,43	13,24
	3	0,00	4,09	9,26			
	6	0,00	4,77	7,79			
	10	0,00	4,04	9,76			
28 dias	0	0,00	6,49	15,15	0,00	6,49	14,30
	3	0,00	6,31	13,63			
	6	0,00	6,11	12,21			
	10	0,00	5,80	15,72			
60 dias	0	2,37	9,77	20,00	1,11	8,92	16,73
	3	0,00	7,70	20,00			
	6	0,00	7,73	20,00			
	10	0,00	8,19	20,00			
91 dias	0	0,00	12,73	20,00	3,46	11,27	19,08
	3	0,00	11,50	20,00			
	6	0,00	9,40	20,00			
	10	0,00	11,44	20,00			

Tabela 34 - valores médios obtidos e calculados de profundidade carbonatada para o pigmento verde

Idade	Teor (%)	e (mm) – obtido			e (mm) - calculado		
		a/c			a/c		
		0,40	0,55	0,70	0,40	0,55	0,70
14 dias	0	0,00	4,82	8,81	0,00	5,05	12,31
	3	0,00	4,44	10,75			
	6	0,00	4,33	10,83			
	10	0,00	4,65	8,25			
28 dias	0	0,00	6,49	15,15	0,00	6,49	13,75
	3	0,00	7,07	12,35			
	6	2,79	6,81	16,43			
	10	0,00	6,42	13,07			
60 dias	0	2,37	9,77	20,00	2,51	9,77	17,03
	3	1,14	10,34	20,00			
	6	3,47	11,49	20,00			
	10	2,95	10,65	20,00			
91 dias	0	0,00	12,73	20,00	5,70	12,95	20,21
	3	2,81	14,98	20,00			
	6	4,57	17,10	20,00			
	10	3,24	17,05	20,00			

A partir desses valores foram traçadas curvas que representam a tendência de comportamento do material para a profundidade carbonatada, onde as linhas cheias representam o comportamento dos concretos segundo o modelo matemático e as curvas tracejadas representam os valores obtidos experimentalmente.

Da mesma forma que as outras propriedades analisadas, a relação a/c influencia significativamente na profundidade de carbonatação, como pode ser observado na Figura 31.

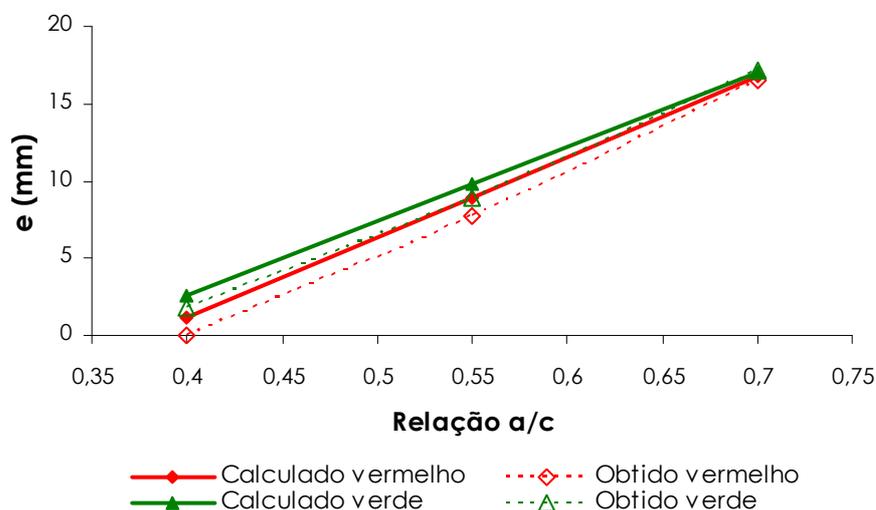


Figura 31 – Efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação.

Como era esperado, quanto maior a relação a/c, maior a facilidade de penetração de CO_2 e, conseqüentemente, maior a carbonatação. Aumentando a relação a/c de 0,40 para 0,55, tem-se um incremento na carbonatação de 81%, no entanto, passando da relação a/c 0,55 para a relação a/c 0,70, esse aumento é de cerca de 60%. Quanto maior a relação a/c, maior a profundidade de carbonatação, independentemente de quaisquer outros fatores, sendo esse comportamento de consenso e constatado por outros pesquisadores (PAULETTI, 2004, ABREU, 2004, KULAKOWSKI, 2002, entre outros).

Analisando estatisticamente a influência do tipo de pigmento sobre a profundidade carbonatada, o mesmo não se apresenta significativo para um nível de significância de 95%.

A Figura 32 apresenta a frente de carbonatação ao longo do tempo. Como era esperado, a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do tempo de exposição. Tem-se um incremento na carbonatação mais acentuado nas primeiras idades de exposição ao CO_2 , onde aos 14 dias a profundidade de carbonatação encontrada representa 42% da profundidade de carbonatação aos 91 dias. Tal comportamento também foi encontrado por Pauletti (2004), onde

ainda a autora relata que, o incremento na profundidade de carbonatação nas primeiras idades é mais acentuado nas relações a/c elevadas.

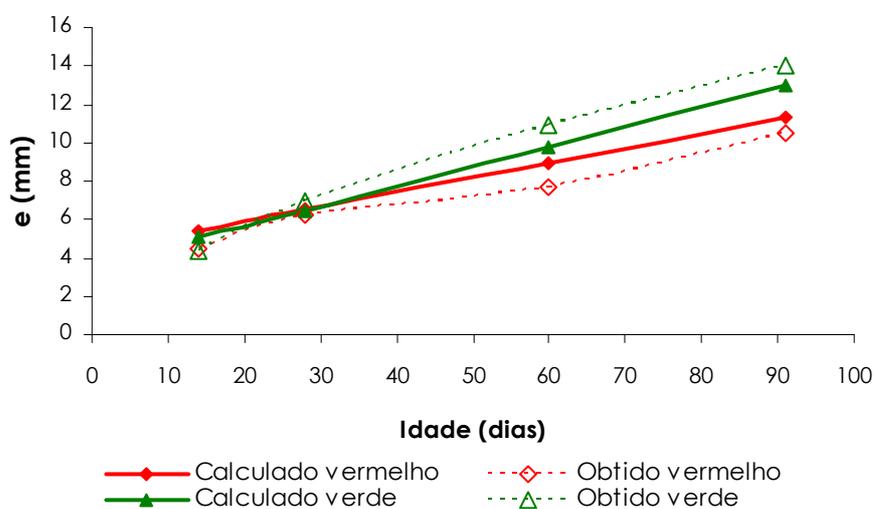


Figura 32 – Efeito isolado da idade na profundidade de carbonatação

Coelho (2001), analisando a influência da adição de pigmentos na carbonatação do concreto de cimentos Portland branco e cinza, verificou que após um ano de exposição em ambiente de laboratório, os concretos com maior relação a/c apresentaram uma maior profundidade carbonatada. Quanto à incorporação de pigmentos, o autor verificou que houve um incremento na profundidade de carbonatação para pigmentos utilizados nos seguintes teores: vermelho (2,4% de adição), preto (2,5% de adição) e amarelo (3,0% de adição).

Alencar et al. (2005) também verificaram um incremento na carbonatação, aos 90 dias, em concretos de cimento Portland branco com a adição de 4% do pigmento vermelho e 7% do pigmento amarelo, ao passo que com a adição de 8% do pigmento preto os valores, praticamente, se mantêm em relação ao traço referência. Os autores justificam o aumento na carbonatação, em função da grande área específica apresentada pelos pigmentos (amarelo e vermelho), o que gerou um incremento de água na mistura para conseguir alcançar o abatimento fixado, o que justifica o aumento da porosidade do material.

Geyer (2001) afirma que a adição de materiais pouco pozolânicos, como os pigmentos, no concreto tem ação predominantemente física, e sua interferência

na carbonatação passa muito mais pela redução ou não da porosidade e permeabilidade do concreto.

Os resultados obtidos na carbonatação estão coerentes com os obtidos na resistência à compressão e absorvidade, onde pequenos teores de adição tem pouca influência na profundidade carbonatada, apresentando, às vezes, valor inferior ao concreto referência. Com 10% de adição os valores se equiparam ao referência, apresentando uma tendência de crescimento da profundidade carbonatada à medida que se aumentaria o teor de adição.

5.2.3 Penetração de íons cloretos

Os resultados do ensaio de penetração de cloretos foram obtidos a partir dos dados de corrente registrados ao longo do ensaio, calculados conforme a Equação 2 prescrita pela ASTM C 1202/97.

O Apêndice 5 apresenta os resultados do ensaio de penetração acelerada de cloretos, onde se pode verificar a carga total passante pelo corpo-de-prova durante o ensaio e a classificação quanto à permeabilidade a cloretos indicada pela norma.

A Tabela 35 mostra a análise de variância realizada com os dados obtidos, onde para o pigmento vermelho a relação a/c e a interação entre ela e o teor de pigmento influenciam na resistência à penetração de cloretos. Para o pigmento (Tabela 36) verde, apenas a relação a/c apresenta influência significativa sobre os resultados.

Tabela 35 - análise de variância da penetração de cloretos com pigmento vermelho (Q)

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	1533600	151,812	3,020E-09	S
Teor de adição	3	16456,47	1,629	0,234	NS
a/c * teor	6	54573,75	5,402	0,006	S

Tabela 36 - análise de variância da penetração de cloretos para o pigmento verde (Q)

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	2496107	198,385	6,400E-10	S
Teor de adição	3	316,019	0,025	0,994	NS
a/c * teor	6	8004,816	0,636	0,700	NS

GDL: graus de liberdade MQ: média quadrática F: valor calculado de F
 NS: Valor não significativo S: Valor significativo
 Se valor de p < 5%: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

Partindo da análise de variância, onde o teor de adição não foi significativo para ambos os pigmentos, foi realizada a modelagem de regressão múltipla apenas com a relação a/c e também, para o pigmento vermelho, a interação entre o teor de adição e a relação a/c.

O resultado da análise de regressão múltipla para o ensaio de penetração de cloretos resultou nas Equações 12 e 13. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado indica que os modelos explicam 89,54 e 95,91% da variabilidade dos resultados do ensaio.

$$\text{carga}_{\text{vermelho}} = -2215,8 + 2889,3 \cdot \exp(ac^3) - 100,328 \cdot \text{teor} \cdot (ac^3) \quad \text{Equação 12}$$

$$(R^2 = 89,54\%)$$

$$\text{carga}_{\text{verde}} = -2637,82 + 3197,75 \cdot \exp(ac^3) \quad \text{Equação 13}$$

$$(R^2 = 95,91\%)$$

Onde:

ac = relação a/c

teor = teor de adição do pigmento

As Tabelas 37 a 40 apresentam a análise de variância dos modelos apresentados, onde o valor de p encontrado, menor que 0,01, indica que a relação entre as variáveis apresenta significância estatística a um nível de confiança de 99%.

Tabela 37 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento vermelho (Q)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	-2215,8	253,13	-8,753	0,0000
$\exp(ac^3)$	2889,3	218,62	13,216	0,0000
$\text{teor} \cdot (ac^3)$	-100,3	31,46	-3,188	0,0044

Tabela 38 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento vermelho (Q)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	3,224E6	2	1,612E6	99,48	0,0000
Residual	340380,0	21	16208,6	-	-
Total	3,565E6	23	-	-	-

Tabela 39 - análise de variância da regressão múltipla linear com pigmento verde (Q)

Parâmetros	Coefficientes	Erro padrão	Teste T	Valor de p
constante	-2637,82	168,791	-15,627	0,0000
exp (ac ³)	3197,75	137,556	23,246	0,0000

Tabela 40 - parâmetros dos fatores analisados para pigmento verde (Q)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	4,989E6	1	4,989E6	540,42	0,0000
Residual	203101,0	22	9231,87	-	-
Total	5,1928E6	23	-	-	-

Se valor de p < 5%: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

Onde,

F = teste F, valor calculado

p = nível de significância associado ao valor calculado de F

SQ = soma dos quadrados

GDL = graus de liberdade

MQ = média dos quadrados

Os valores obtidos no programa experimental e os valores calculados através dos modelos matemáticos podem ser visualizados na Tabela 41.

Tabela 41- valores médios obtidos e calculados de carga passante

Relação a/c	Teor (%)	Vermelho		Verde	
		Q (coloumbs)		Q (coloumbs)	
		obtido	calculado	obtido	calculado
0,40	0	853,25	864,46	853,25	771,28
	3	738,95	845,20	796,50	
	6	729,32	825,93	711,90	
	10	943,34	800,25	765,72	
0,55	0	1112,85	1196,51	1112,85	1138,77
	3	1125,45	1146,43	1076,49	
	6	1212,75	1096,36	1113,30	
	10	1124,55	1029,59	1188,90	
0,70	0	1817,27	1855,71	1817,27	1868,35
	3	1906,20	1752,47	1901,70	
	6	1603,96	1649,24	1926,27	
	10	1405,80	1511,59	1849,44	

Como era de se esperar, a relação a/c aparece como variável significativa no dois modelos matemáticos da penetração de cloretos. A Figura 33 apresenta seu comportamento isolado com relação à carga total passante.

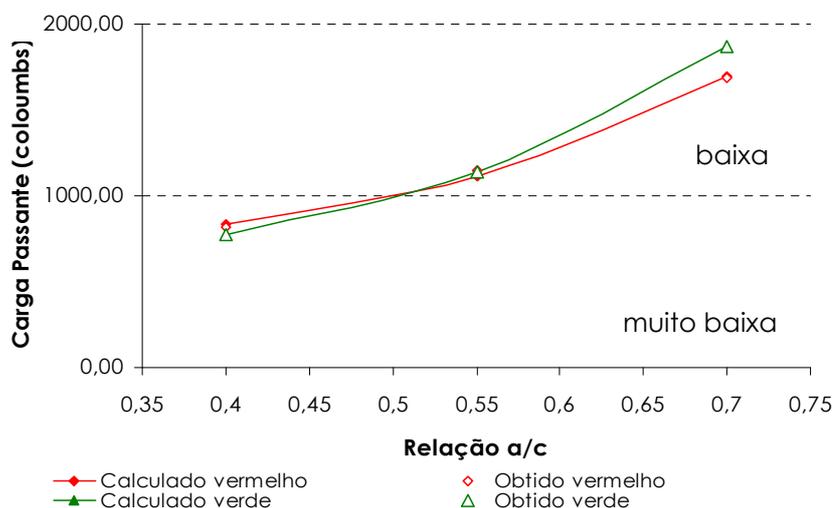


Figura 33 – Efeito isolado da relação a/c na carga total passante

Nota-se novamente a proximidade dos valores obtidos para os pigmentos utilizados. Através da análise de variância pode-se comprovar que o tipo de pigmento não apresenta efeito significativo sobre a carga passante no concreto. Observa-se, também, que com a redução da relação a/c de 0,70 para 0,40 há uma redução da carga total passante devido à redução da porosidade, tornando a estrutura da pasta mais fechada e densa, o que dificulta a passagem dos íons através do concreto. Esta redução foi da ordem de 55%.

Esses resultados foram coerentes aos verificados na bibliografia, tanto em concretos de cimento Portland composto (Masuero, 2001; Reschke, 2003, entre outros) como em concretos de cimento Portland branco (Mattos e Dal Molin, 2004; Rizzon, 2006).

Da mesma forma que para a absorção por sucção capilar, o teor de pigmento não apresentou influência significativa nos resultados, porém, a sua interação com a relação a/c foi significativa, mostrando que para cada relação a/c utilizada o teor de pigmento tem efeito diferenciado (pigmento vermelho).

A Figura 34 apresenta o efeito da interação entre a relação a/c e o teor de pigmento na carga passante para o concreto com pigmento vermelho.

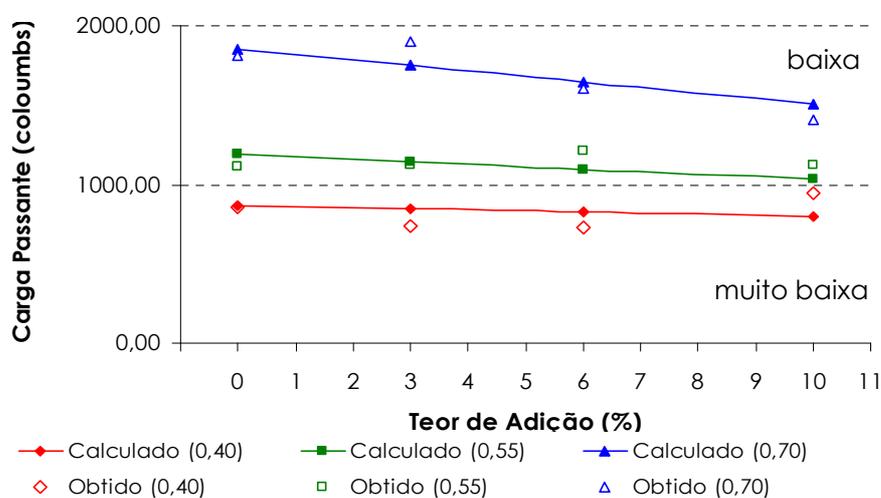


Figura 34 – Efeito da interação entre a relação a/c e o teor de pigmento na carga total passante para o concreto com pigmento vermelho

Da mesma forma que para a resistência à compressão, nota-se o efeito da adição de pigmento nas maiores relações a/c, pois quanto maior a porosidade, maior a influência da adição como agente redutor de vazios. Para os traços com relação a/c=0,70 e 10% de adição a carga total passante é reduzida cerca de 20% com relação ao concreto referência.

Segundo o critério de classificação da resistência à penetração de cloretos da ASTM C 1202 (1992), os concretos com relações a/c de 0,55 e 0,70 apresentaram baixa penetração, enquanto que o concreto com relação a/c igual a 0,40 apresentou muito baixa penetração.

De uma forma geral, pode-se afirmar que a adição do pigmento vermelho em até 10% diminui a penetração de cloretos para as relações a/c utilizadas. Masuero (2000), citando Hisada et al. (1999)⁵, explica que o uso de adições, em diferentes teores, aumentam a resistência à penetração de íons cloretos, normalmente pela densificação da zona de transição e diminuição dos poros. Ainda esse mesmo

⁵ HISADA et al. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. Cement and Concrete Composites. Elsevier, v. 21, p. 443-448, 1999.

autor, citando Hornain et al. (1995)⁶, afirma que o uso de fíler propicia a formação de um estrutura de poros descontínua, favorecendo a diminuição do coeficiente de difusão.

5.3 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

Passuelo (2004) afirma que a cor final do concreto é uma composição das cores originais dos materiais que o compõe (cimento, agregados, adições e aditivos), assim como a dosagem empregada na mistura. Neste trabalho, utilizando as coordenadas cromáticas L^*a^*b , verificou-se apenas a influência do teor de pigmento e da relação a/c na cor final dos concretos. Isso porque os demais materiais utilizados, como cimento, agregados e aditivos foram fixados.

A diferença na cor foi calculada através da razão entre os parâmetros L^* e a^* , os quais representam a luminosidade (L^*) da amostra e os tons vermelho ($+a^*$) e verde ($-a^*$). Os valores obtidos no ensaio e a razão L^*/a^* podem ser visualizados no Anexo 6.

Com os dados colorimétricos obtidos nas leituras espectrofotométricas realizou-se a análise de variância (ANOVA) a fim de avaliar a influência da relação a/c e do teor de pigmento na cor final do concreto. Com isso, também procurou-se estabelecer o teor ótimo de adição de cada pigmento.

A análise estatística é apresentada nas Tabelas 42 a 44 e a influência dos fatores significativos será discutida nos itens a seguir.

Tabela 42 - análise de variância da razão L^*/a^* para o pigmento vermelho

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	0,360	10,709	0,004	S
Teor de adição	2	0,301	8,978	0,007	S
a/c * teor	4	0,033	0,996	0,457	NS

⁶ HORNAIN, H. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research. V. 25. n. 8. Elsevier Science Ltd. p. 1667-1678.

Tabela 43 - análise de variância da razão L^*/a^* para o pigmento verde

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	2,673	107,146	5,298E-07	S
Teor de adição	2	10,503	420,864	1,2831E-09	S
a/c * teor	4	0,041	1,662	0,241	NS

Tabela 44 - análise de variância da razão L^*/a^* para o concreto referência

Fonte	GDL	MQ	F	Valor de p	efeito
Relação a/c	2	4503,97	1,478	0,357	NS

GDL: grau de liberdade

MQ: média quadrática

F: valor calculado de F

NS: Valor não significativo

S: Valor significativo

Se valor de $p < 5\%$: efeito significativo (para um nível de significância de 95%)

- **Influência da relação a/c na cor do concreto**

Conforme os dados obtidos na ANOVA, a relação a/c teve efeito significativo na relação L^*/a^* dos concretos produzidos com adição de pigmento. Para o concreto branco (referência), a relação a/c não teve influência significativa na relação L^*/a^* , porém pode-se constatar nos valores obtidos (Anexo 6) que houve um incremento na luminosidade (L^*) da superfície à medida que se aumenta a relação a/c.

Nas Figuras 35 e 36 observa-se que o aumento da relação a/c produz um crescimento na relação L^*/a^* , indicando que quanto mais água, mais clara fica a superfície do concreto. Nos traços com o pigmento vermelho esse aumento é mais acentuado entre as relações a/c 0,55 e 0,70, onde houve um incremento de 17%, ao passo que da relação a/c 0,40 para 0,55 o acréscimo é de apenas 1,6%. Já para o concreto com pigmento verde o incremento na relação L^*/a^* é maior entre as relações a/c 0,40 e 0,55, cerca de 15% que entre as relações a/c 0,55 e 0,70, onde o acréscimo foi de apenas 2,4%.

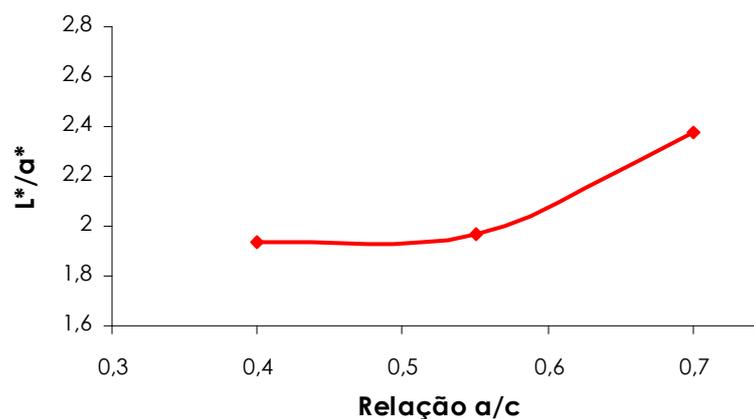


Figura 35 – Efeito isolado da relação a/c na cor do concreto com pigmento vermelho

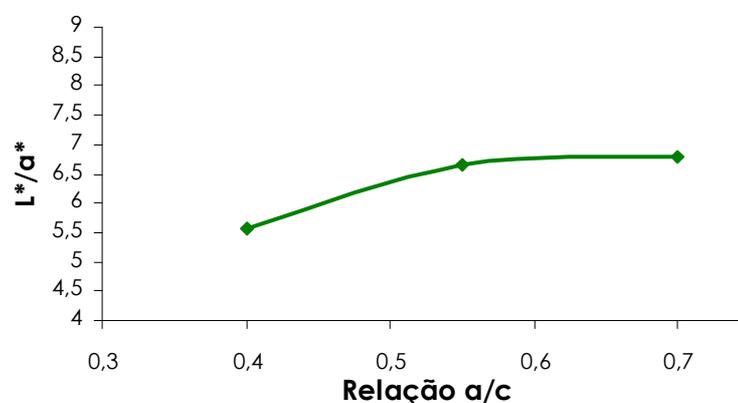


Figura 36 – Efeito isolado da relação a/c na cor do concreto com pigmento verde

Coelho (2001) afirma que os concretos de cimento branco sem pigmentos são mais estáveis cromaticamente, porém os com adição de pigmentos e, sobretudo, com altas relações a/c, têm uma variação cromática (ΔE^*) bastante elevada.

Passuelo (2004) associa a maior alvura do concreto com o aumento da relação a/c ao fato de que quanto maior a quantidade de água presente na mistura, maior é a mobilidade das partículas finas e sua migração para a superfície.

- **Influência do teor de adição na cor do concreto**

Como esperando, o aumento do teor de pigmento influencia significativamente as características colorimétricas finais do concreto. Quanto menor a razão entre L^*/a^* , mais próximo o concreto está da cor original do pigmento, sendo esses valores iguais a 1,20 e 3,09 para os pigmentos vermelho e verde, respectivamente.

A Figura 37 apresenta os valores de L^*/a^* para o concreto com pigmento vermelho onde se nota que, à medida que aumenta a quantidade de pigmento, mais escuro e mais vermelho fica a superfície do concreto. A diferença obtida na tonalidade do concreto entre os teores de 3 e 6% de adição é de 11%, ao passo que de 6 para 10% essa diferença cai para 7%.

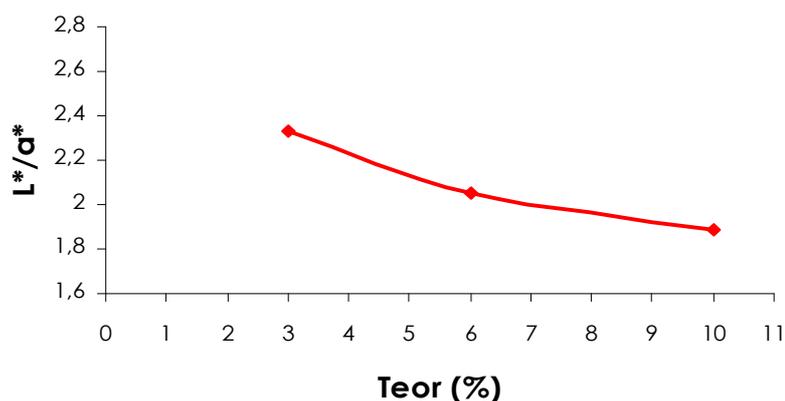


Figura 37 – Efeito isolado do teor de adição na cor do concreto com pigmento vermelho

Adicionalmente, foi realizada a comparação múltipla das médias (Teste de Duncan) a fim de avaliar estatisticamente a diferença entre cada teor de adição. A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos para o pigmento vermelho, onde pode-se notar que há uma diferença significativa na cromacidade do concreto quando se aumenta o teor de adição de 3 para 6% e também de 3 para 10%. A diferença obtida na cromacidade do concreto entre os teores de 6 e 10% de adição não é estatisticamente significativa. Dessa forma pode-se afirmar que a adição do pigmento vermelho em percentuais superiores a 6% apresentam tonalidades semelhantes, sendo mais vantajoso tal percentual.

Tabela 45 - teste de DUCAN sobre o efeito isolado do teor de adição – vermelho

L^*/a^*	2,333	2,054	1,890
Fonte	3%	6%	10%
3%		0,027	0,003
6%	0,027		<i>0,155</i>
10%	0,003	<i>0,155</i>	

Para o concreto com pigmento verde, assim como com o vermelho, à medida que se aumenta o teor de pigmento se obtém tons de concreto mais próximos à

cor original do pigmento. Na Figura 38 nota-se que há uma diferença maior na cor superficial do concreto entre os teores de adição de 3 e 6%, esse acréscimo é cerca de 24%, entre os teores 6 e 10% a diferença na cor (L^*/a^*) é de apenas 8%.

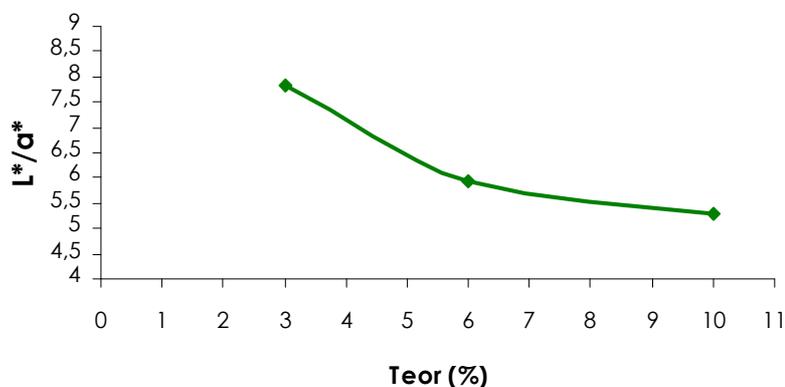


Figura 38 – Efeito isolado do teor de adição na cor do concreto com pigmento verde

A comparação múltipla de média do concreto com o pigmento verde pode ser visualizada na Tabela 46. Diferente da ação do pigmento vermelho no concreto, o pigmento verde apresenta diferença significativa na tonalidade dos concretos entre todos os teores utilizados, havendo uma diferença maior entre os 3 e 10% de pigmentação.

Tabela 46 - teste de DUCAN sobre o efeito isolado do teor de adição - verde

L^*/a^*	7,821	5,922	5,276
Fonte	3%	6%	10%
3%		0,0002	9,16E-05
6%	0,0002		0,0002
10%	9,16E-05	0,0002	

Hendges et al. (2004), analisando comparativamente o desempenho mecânico e as tonalidades obtidas dos concretos de cimento branco com adição dos pigmentos vermelho, amarelo e preto, concluíram que a adição de 8% do pigmento amarelo foi a que obteve os melhores resultados, ao passo que para o pigmento vermelho o percentual ideal encontrado foi de 4% e para o pigmento preto o teor ótimo de adição foi de 6%.

Helene e Galante (1999) explicam que as menores quantidades (1 a 2% sobre a massa do cimento), geralmente, são suficientes quando se usam os pigmentos preto e marrom. As maiores quantidades (8 a 10%) são utilizadas para os tons amarelo, verde e azul. A quantidade intermediária (3 a 6%) é uma boa referência para a tonalidade vermelha.

Cabe salientar que a análise colorimétrica realizada por Helene e Galante (1999) e Hendges et al. (2004) foi apenas visual, não fazendo uso de equipamentos e métodos adequados.

O teor ótimo de pigmento a ser adicionado no concreto depende muito da relação a/c que irá ser utilizada, uma vez que essa também influencia significativamente na cromacidade superficial do concreto. Pode-se afirmar, nas condições estabelecidas nesse trabalho, que com 6% de adição, os concretos com pigmento vermelho já atingem tonalidades próximas a cor original do pigmento, ao passo que os concretos com pigmento verde é necessário a adição de 10% para se obter tonalidades mais escuras e mais próximas à cor original do pigmento.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de avaliar a influência da adição de pigmentos em algumas propriedades de durabilidade e na cromacidade de concretos de cimento Portland branco, neste trabalho foram estudados concretos moldados com relações água/cimento de 0,40, 0,55 e 0,70, adição de dois tipos pigmentos de bases químicas diferentes em três teores, 3%, 6% e 10%. Todos os resultados obtidos foram analisados estatisticamente.

As conclusões apresentadas a seguir apesar de estarem em consonância com a maior parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois estão relacionadas às condições determinadas nesta pesquisa, especialmente aos materiais e métodos utilizados no programa experimental.

6.1 CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos no programa experimental e, com base na revisão bibliográfica, pode-se elucidar as seguintes conclusões:

a. Em relação à resistência à compressão

Com base nas análises realizadas, pode-se afirmar que os concretos com adição de pigmentos obtiveram um pequeno, porém significativo, incremento na resistência à compressão, possivelmente associado ao efeito físico da adição do pigmento.

Analisando a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição na resistência à compressão do concreto, conclui-se que:

- a resistência à compressão decresce significativamente com o aumento da relação a/c;

- verifica-se que o crescimento da resistência com o aumento da idade de cura em todos os concretos analisados, o que se deve à hidratação do cimento;
- o teor de pigmento, apesar de significativo, provocou um pequeno ganho de resistência à compressão; houve um incremento na resistência de 5% com adição do pigmento vermelho e 2% com a adição do pigmento verde;
- o tipo de pigmento (vermelho e verde) adicionado no concreto não apresentou influência significativa sobre a resistência à compressão.

b. Em relação à durabilidade

Analisando a influência da relação a/c, do tipo de pigmento e do teor de adição sobre algumas propriedades de durabilidade, conclui-se que:

Absorção de água por capilaridade

- quanto maior a relação a/c, maior a taxa de absorção capilar e inversamente, menor é a resistência capilar do concreto;
- o teor de adição de pigmento não tem influência significativa sobre a taxa de absorção e resistência capilar;
- o tipo de pigmento não influencia na absorção de água por capilaridade, sendo as curvas de comportamento muito semelhantes e próximas.

Carbonatação acelerada

- a relação a/c influencia fortemente na carbonatação do concreto, observado-se que quanto maior a relação a/c, maior a facilidade de penetração de CO₂ e , conseqüentemente, maior a carbonatação do concreto;
- o teor de pigmento não apresenta influência significativa na profundidade de carbonatação;

- o tipo de pigmento utilizado não apresentou significância sobre a profundidade de carbonatação.

Penetração de íons cloreto

- a relação a/c, assim como nos demais ensaios, afeta significativamente a penetração de íons cloreto, observando-se que quando há uma redução da relação a/c há, também, uma redução da carga total passante;
- quanto à influência do teor de pigmento, embora não ser significativo, nota-se o seu efeito principalmente nos concretos com relação a/c elevada, onde há uma redução da carga passante em até 20%;
- o tipo de pigmento não apresenta influência significativa na carga total passante.

c. Em relação à cromacidade

A cor final do concreto é uma composição das cores originais dos materiais que o compõem, assim como a dosagem empregada na mistura. Utilizando as coordenadas cromática L^*a^*b , avaliou-se a influência apenas dos parâmetros que foram alterados durante a mistura, o teor de pigmento (material) e a relação a/c (dosagem), concluindo que:

- a relação a/c tem influência significativa na cor final dos concretos com adição de pigmento. O aumento da relação a/c produz um crescimento na relação L^*/a^* , indicando que quanto mais água, mais clara fica a superfície do concreto, principalmente com a adição do pigmento vermelho;
- o teor de pigmento influencia significativamente nas características colorimétricas finais do concreto, à medida que se aumenta o teor de adição mais escura e mais próxima da cor original do pigmento fica a superfície do concreto. Com 6% de adição do pigmento vermelho já se obtém tons muito próximos a cor original do pigmento, sendo vantajoso o uso de tal percentual, ao passo que nos concreto com pigmento

verde é necessário a adição de 10% para se obter tonalidades mais escuras e mais próximas a cor do pigmento.

Fazendo uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios e cor final da superfície do concreto, pode-se dizer que a adição de 6% do pigmento vermelho e 10% do pigmento verde majoram a resistência à compressão e algumas propriedades de durabilidade do concreto (carbonatação, penetração de cloretos e absorção de água) principalmente para elevadas relações a/c. Isso se deve principalmente ao efeito físico apresentado pelo pigmento, a alta finura refina da estrutura dos poros, o que promove um melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura.

Novamente, deve-se salientar que estas conclusões podem ser consideradas como indicativos importantes mas que estão associadas aos materiais e condições experimentais empregados neste trabalho. Sua generalização deve ser feita com cautela, devendo ser validada por trabalhos adicionais.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sendo a produção de concretos cromáticos uma tecnologia relativamente nova, inúmeras incógnitas sobre a mesma ainda permanecem. A título de sugestões para ampliação e prosseguimento do estudo da utilização de pigmentos em concretos, visando a caracterização do seu desempenho, propõe-se as seguintes questões:

- Verificação de propriedades que caracterizem o concreto com adição de pigmentos quanto às suas propriedades mecânicas: módulo de elasticidade, resistência à flexão, resistência à tração, entre outras;
- Utilização do pigmento em concretos com cimentos tradicionais, avaliando à resistência à compressão, durabilidade e cromacidade dos mesmos;
- Analisar a durabilidade estética através das modificações cromáticas obtidas pela interação do concreto com o meio ambiente;

- Avaliar alguns sistemas de cura e proteção superficial, identificando a influência na cromacidade original do concreto e o desempenho na manutenção da cor ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, A. L. R. **Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados**. 2004. 249f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AGUIAR, C. **Cimento Portland branco estrutural: análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão**. 2006, 88f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ALENCAR, R. S. et al. A influência da adição de pigmentos na resistência à compressão e durabilidade de concretos com cimento branco e cinza. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47º, Recife, 2005. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2005 (CD-ROM).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202/92**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2244/84**: Standard test method for calculation of colour differences from instrumentally measured colour coordinates. Pennsylvania, 1984.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.3, p.724-742, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORLAND. **Pavimentos Intertravados**. Prática Recomendada – PR. 2. São Paulo, SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico:. Rio de Janeiro, 1994a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989**: Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – determinação da massa unitária e dos espaços vazios. Rio de Janeiro, 2002a.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Hormigones de alta prestación elaborados con cemento gris y cemento blanco. In: Jornadas de desarrollo e innovación, 4., 2002, Argentina. **Anais...** Argentina: [s.n.], 2002.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Estudio de hormigones convencionales elaborados con cemento gris y cemento blanco utilizando un aditivo de doble efecto. In: VII Congresso Latino Americano de Patologia de la Construcción, 2003, Mexico. **Anais...** Cap. II, p. 1-7, 2003.

BÜCHNER G.; Pigments in concrete production. Betonwerk und Fertigteil-Technik. 1991, vol. 57, n. 8, p. 54-61.

CABRERA, O., BONAVETTI, V. DONZA, H., IRASSAR, E. F. Efecto del curado en la evolución de la resistencia de hormigones com filler calcáreo. In: 1er Congresso

Internacional de Tecnologia del Hormigón. **Anais**. Buenos Aires, Argentina. Associação Argentina de Tecnologia del hormigón. Jun/1998. p. 183-194.

CAMPOS, C. White concrete in Brazil. In: IV International ACI/CANMET conference on quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. Olinda – PE, 2005. **Anais...** ACI - American Concrete Institute, 2005 (CD-ROM).

CARVALHO, F. C.; CALAVERA, J. Estabilidade colorimétrica e influência da incorporação de pigmentos em concretos submetidos a diferentes estados de exposição ambiental. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44º, Belo Horizonte, 2002. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002 (CD-ROM).

COELHO, F. C. A. **Variación del color y textura de hormigones vistos con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental**. Tese (Doutorado em Ingeniero de Caminos Canales y Puertos). Universidad Politécnica de Madrid, U. P. MADRID. Espanha. 2001.

COLAK, A. Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with White Portland cement. **Construction and Building Materials**. Vol. 22, p. 2276-2280, 2008.

COSTA, A. C. et al. Propriedades mecânicas do concreto colorido de alta resistência. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 46º, Florianópolis, 2004. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2004 (CD-ROM).

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssilica**. 1995, 286p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D.; Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa em engenharia civil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 2, p. 37- 49, abr./jun. 2005.

FONSECA, A. A., NUNES, A. Betão Branco; fabrico, características e utilização estrutural. In: 2^{as} Jornadas de Estruturas de Betão, 1998. **Anais...** Portugal: FEUP, 1998.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** 2001, 216p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000, 120p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

HAMAD, B. S. Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete. **Elsevier Science** Inc. Nova York: Elsevier Science Inc., p.161-167, 1995.

HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L. Recorde mundial em concreto de alto desempenho colorido. In; Congresso Brasileiro do Concreto, 45º, Vitória - ES, 2003. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2003 (CD-ROM).

HELENE, P. R. L.; GALANTE, R. Concreto colorido, São Paulo, 1999. In: Congresso Brasileiro do cimento, 5º **Anais...** São Paulo: Congresso Brasileiro de cimento (CBO), 1999 (CD-ROM).

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HENDGES. et al. Resistência à compressão, custo e coloração de concretos produzidos com pigmentos e cimentos Portland cinza e branco. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 46º, Florianópolis, 2004. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2004 (CD-ROM).

ISAIA, G., HELENE, P. Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. In: Seminário Qualidade e Durabilidades das Estruturas de Concreto, Porto Alegre, 1993. **Anais...** Porto Alegre: Núcleo Orientado para Inovação da Edificação, 1993.

KARTZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*. n. 2236, p. 1-9, 2002.

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

KIRCHHEIM et al. Durabilidade do concreto branco: estudos realizados. In: II Seminário de Patologia das Edificações "Novos Materiais e Tecnologias Emergentes", Porto Alegre, 2004. **Anais...** Porto Alegre/RS Universidade Federal do Rio Grande do Sul /LEME, 2004.

KIRCHHEIM et al. Concreto Branco. In: IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p.

KRASOWSKY, J. Concreto arquitetônico: cuidados especiales em su fabricación. **Construcción y Tecnologia**, n. 112, p. 6-12, 1997.

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com Adição de Microsílica para Reparos Estruturais: Estudo da Penetração de Cloretos**. 1994. 131p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002, 199f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LANXESS. Coloração do concreto – instruções de processamento. Maio de 2002. Disponível em: < <http://www.bayferrox.com.br>>. Acessado em 25/02/2008.

LEE, H. S. LEE, J. Y., YU, M. Y. Influence of iron pigments on the properties of concrete interlocking blocks. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1889-1986, 2003.

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

MACEDO, D. C. B. et al. Concreto de alto-desempenho colorido com materiais de Goiânia – Goiás. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 46º, Florianópolis, 2004. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2004 (CD-ROM).

MATTOS, L. R. S., DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência do cimento Portland branco estrutural na resistência à penetração acelerada de íons cloretos e na absorvidade de concretos com diferentes relações água/cimento. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45º, Vitória - ES 2003. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2003 (CD-ROM).

MASUERO, A. B. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** 2000, 207p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MENADI, B. KENAI, S. KHATIB, J. AIT-MOKHTAR, A. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. **Construction and Building Materials.** Vol. 23. 625-633. 2008.

MOURA, W. A. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição do cimento.** 2001, 268p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NERO, J. M. G.; NUNES, A. Fundamentos para a Prescrição e Utilização do Betão Branco. **SECIL**, Portugal, 1999.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromacidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco.** 2004, 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PASSUELO, A. et al. Análise de sistemas de proteção superficial para concreto branco estrutural. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 48º, Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2006 (CD-ROM).

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004, 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PERREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura.** 2001, 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). What is white concrete. **Concrete technology today.** v.20, n.1, 1999a.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). White cement concrete and colored concrete construction. **Concrete technology today.** v.20, n.3, 1999b.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). Guide for specifying white and colored concrete. **Concrete Information.** PCA R & D Serial N. 5420, 2001a.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). Ready mix: making the white decision. **Concrete Information.** PCA R & D Serial N. 2557, 2001b.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). White Concrete: New Avenues of Safety. **Concrete Information.** PCA R & D Serial N. 2618, 2002a.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Light Reflective Floors. **Concrete Information.** PCA R & D Serial N. 2570, 2002b.

PRUDÊNCIO, L. R. Durabilidade do concreto frente ai ataque de cloretos e sulfatos. In: Seminário Qualidade e Durabilidades das Estruturas de Concreto, Porto Alegre, 1993. **Anais...** Porto Alegre: Núcleo Orientado para Inovação da Edificação, 1993.

RAMOS, R. R. C. M. **Avaliação do desempenho de sistemas destinados a proteção de concreto aparente.** 1991. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil),

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

RESCHKE, J. S. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 2003, 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Revista Pisos Industriais. **Pigmentos para concreto**. 5ª edição – matéria prima (2006). Disponível em: <<http://www.pisosindustriais.com.br/materias/noticia.asp?ID=106>>. Acesso em 09/12/2007.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Apostila de aula. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2000.

RIZZON, A.C. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco**. 2006, 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Luterana do Brasil, Porto Alegre, 2006.

ROJAS, D. L. Durabilidade do concreto colorido. **Technical Service**, Bayer. São Paulo, 30/09/2001.

SELMA, D., MONTEIRO, P. J. M. Of Our Lady of Angels. **Concrete International**. P 26-33, November, 2001.

SILVA, et al.. Estudo da absorção capilar em concretos brancos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47º, Recife, 2005. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005 (CD-ROM).

SHI, H. S., XU, B. W., ZHOU, X. C. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. **Construction and Building Materials**. August, 2008.

STÜMER, S.; MÜLLER, A.; STARK, J. Hydration of C₃A and C₂(A,F) – Separated from sulphate-resisting and white Portland cement – under conditions of normal

hardening on heat treatment. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 3, p. 503-513, January, 1994.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. British Library, 1992.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D.C. Concretos produzidos com cimentos Portland brancos e cinza: avaliação da resistividade elétrica. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47º, Recife, 2005. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto, 2005 (CD-ROM).

APÊNDICE

Apêndice 1: Características dos concretos moldados.

1.1 CONCRETO REFERÊNCIA

Nomenclatura adotada	1 B	2 B	3 B
Data da moldagem	15/04/08	10/04/08	10/04/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	0	0	0
Abatimento (mm)	230	220	210
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2395,52	2375,99	2394,08
Consumo de cimento (kg/m ³)	435,55	318,92	263,09
Consumo de água (L/m ³)	174,22	175,41	184,16

1.2 CONCRETO COM PIGMENTO VERMELHO

Nomenclatura adotada	13 R	23 R	33 R
Data da moldagem	15/04/08	09/04/08	09/04/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	3	3	3
Abatimento (mm)	225	210	200
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2413,61	2417,95	2369,48
Consumo de cimento (kg/m ³)	438,84	324,56	260,38
Consumo de água (L/m ³)	175,54	178,51	182,27

Nomenclatura adotada	16 R	26 R	36 R
Data da moldagem	10/04/08	15/04/08	15/04/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	6	6	6
Abatimento (mm)	230	220	210
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2430,25	2381,05	2375,99
Consumo de cimento (kg/m ³)	441,86	319,60	261,10
Consumo de água (L/m ³)	176,75	175,78	182,77

Nomenclatura adotada	110 R	210 R	310 R
Data da moldagem	09/04/08	09/04/08	10/04/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	10	10	10
Abatimento (mm)	230	220	220
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2415,06	2407,10	2356,45
Consumo de cimento (kg/m ³)	439,10	323,10	258,95
Consumo de água (L/m ³)	175,64	177,71	181,27

1.3 CONCRETO COM PIGMENTO VERDE

Nomenclatura adotada	13 G	23 G	33 G
Data da moldagem	20/05/08	20/04/08	28/05/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	3	3	3
Abatimento (mm)	230	200	210
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2420,85	2425,19	2351,39
Consumo de cimento (kg/m ³)	440,15	325,53	258,39
Consumo de água (L/m ³)	176,06	179,04	180,88

Nomenclatura adotada	16 G	26 G	36 G
Data da moldagem	28/05/08	28/05/08	28/05/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	6	6	6
Abatimento (mm)	220	220	210
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2426,63	2402,76	2372,37
Consumo de cimento (kg/m ³)	441,21	322,52	260,70
Consumo de água (L/m ³)	176,48	177,38	182,49

Nomenclatura adotada	110 G	210 G	310 G
Data da moldagem	20/05/08	20/05/08	20/05/08
Teor de argamassa (%)	60	60	60
Teor de aditivo (%)	1,28	1,28	1,28
Relação a/c	0,40	0,55	0,70
Teor de pigmento (%)	10	10	10
Abatimento (mm)	235	225	230
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)	2415,06	2412,89	2382,50
Consumo de cimento (kg/m ³)	439,10	323,88	261,81
Consumo de água (L/m ³)	175,64	178,13	183,27

Apêndice 2: Resultados de resistência à compressão

Relação a/c	Teor de pigmento	Idade	fc (Mpa)		Idade	fc (Mpa)		Idade	fc (Mpa)	
			vermelho	Desv. padrão		vermelho	Desv. padrão		vermelho	Desv. Padrão
0,40	0%	7 dias	51,07	0,43	14 dias	53,70	2,96	28 dias	56,85	2,29
			51,35			56,64			57,49	
			50,98			53,75			55,59	
	3%		51,21	5,87		55,94	1,79		55,30	4,10
			48,74			55,23			53,47	
			52,98			56,60			56,69	
	6%		51,00	0,81		52,20	7,57		54,95	2,63
			50,53			48,74			57,21	
			51,00			53,96			56,57	
	10%	50,08	0,64	53,12	7,17	58,69	0,93			
		50,13		53,12		59,54				
		49,52		48,98		58,83				
0,55	0%	7 dias	31,70	0,81	14 dias	36,35	0,54	28 dias	38,91	0,65
			32,17			36,47			39,29	
			32,17			36,82			39,29	
	3%		34,78	0,43		35,98	0,65		42,14	0,32
			34,73			35,83			42,11	
			35,13			36,40			41,83	
	6%		36,96	1,00		38,47	0,83		40,77	1,22
			36,19			38,80			41,05	
			36,05			39,08			41,83	
	10%	35,20	0,37	38,02	0,60	43,45	0,39			
		35,06		37,53		43,38				
		34,92		37,46		43,73				
0,70	0%	7 dias	21,09	1,23	14 dias	22,24	2,52	28 dias	26,03	0,19
			19,89			23,14			26,17	
			19,87			24,20			26,10	
	3%		23,98	0,68		24,20	0,58		28,85	0,14
			23,87			24,69			28,57	
			24,48			24,55			28,71	
	6%		22,78	3,19		26,38	0,86		28,71	2,14
			24,90			26,24			29,91	
			24,34			26,81			29,98	
	10%	22,43	0,57	24,12	1,79	27,93	0,83			
		21,91		23,35		27,65				
		22,01		24,62		27,32				

Relação a/c	Teor de pigmento	Idade	fc (Mpa)		Idade	fc (Mpa)		Idade	fc (Mpa)	
			vermelho	verde		vermelho	verde		vermelho	verde
0,40	0%	7 dias	51,07	0,43	14 dias	53,70	2,96	28 dias	56,85	2,29
			51,35			56,64			57,49	
			50,98			53,75			55,59	
	3%		51,21	0,64		55,94	3,74		55,30	1,15
			48,74			55,23			53,47	
			52,98			56,60			56,69	

	6%		51,00	0,96		52,20	0,78		54,95	0,36				
			50,53			48,74			57,21					
			51,00			53,96			56,57					
	10%		50,08	53,12		58,69	0,29							
			50,13	53,12		59,54								
			49,52	48,98		58,83								
0,55	0%	7 dias	31,70	0,81	14 dias	36,35	0,54	28 dias	38,91	0,65				
			32,17			36,47			39,29					
			32,17			36,82			39,29					
	3%		34,78	0,29		35,98	1,15		42,14	0,47				
			34,73			35,83			42,11					
			35,13			36,40			41,83					
	6%		36,96	0,15		38,47	0,36		40,77	0,61				
			36,19			38,80			41,05					
			36,05			39,08			41,83					
	10%		35,20	0,48		38,02	3,38		43,45	0,80				
			35,06			37,53			43,38					
			34,92			37,46			43,73					
	0,70		0%	7 dias		21,09	1,23		14 dias	22,24	2,52	28 dias	26,03	0,19
						19,89				23,14			26,17	
						19,87				24,20			26,10	
3%		23,98	0,29		24,20	0,19	28,85	0,53						
		23,87			24,69		28,57							
		24,48			24,55		28,71							
6%		22,78	0,63		26,38	0,12	28,71	0,43						
		24,90			26,24		29,91							
		24,34			26,81		29,98							
10%		22,43	0,95		24,12	0,58	27,93	0,85						
		21,91			23,35		27,65							
		22,01			24,62		27,32							

Apêndice 3: Resultados médios obtidos de resistência capilar e taxa de absorção

Relação a/c	Teor de pigmento	Taxa de absorção capilar (g/cm ² *h ^{1/2})		Resistência capilar (h/m ²)	
		vermelho	verde	vermelho	verde
0,40	0%	0,0940	0,0940	14236,42	14236,42
		0,0755	0,0755	15649,11	15649,11
	3%	0,0870	0,0860	14772,89	13521,94
		0,1017	0,0856	13265,31	12638,86
	6%	0,0730	0,0880	12887,79	12675,19
		0,0986	0,0960	13772,89	12376,21
	10%	0,0844	0,0920	7901,03	13360,04
		0,0863	0,1000	7204,50	14265,19
0,55	0%	0,1160	0,1160	11739,33	11739,33
		0,1388	0,1388	8329,68	8329,68
	3%	0,1000	0,1120	13679,67	13417,52
		0,0996	0,1437	13339,72	9550,57
	6%	0,1020	0,0990	13145,05	14686,25
		0,1094	0,01077	14056,31	13450,84
	10%	0,1070	0,1060	12700,61	11341,45
		0,1140	0,1295	12866,17	10762,62
0,70	0%	0,2000	0,2000	5029,67	5029,67
		0,1992	0,1999	8762,62	8386,63
	3%	0,1500	0,1320	7459,95	10993,57
		0,1497	0,1144	1073,00	16146,92
	6%	0,1640	0,1510	7462,85	8386,63
		0,1830	0,1134	9189,14	10490,50
	10%	0,1732	0,1750	6368,96	6225,97
		0,1707	0,1855	8050,45	5672,34

			3,97	4,53
			4,41	2,66
			4,30	4,88
			4,34	4,64
			3,45	4,98
			4,94	4,47
			4,43	4,97
			4,80	5,52
			4,10	3,88
			3,98	3,64
			4,07	3,89
			4,82	4,80
			5,88	5,30
			4,33	5,55
			4,73	2,71
			5,10	3,71
			4,11	4,98
			5,25	3,65
			5,36	2,55
			4,60	5,10
			5,06	4,48
			4,60	4,47
			3,47	3,65
			4,56	2,91
			4,82	4,25
			3,56	6,37
			5,18	3,08
			5,68	4,83
			6,07	4,43
			4,47	3,70
			4,85	4,21
			4,44	4,21
			5,88	3,86
			5,54	5,49
			5,77	4,14
			4,19	4,46
			3,22	4,98
			4,16	3,18
			4,09	4,29
			4,09	5,12
			4,09	6,87
			4,09	2,79
			4,09	4,09
			4,09	3,49
			4,09	5,64
			4,09	6,97
			4,09	8,58
			4,09	2,18
			4,09	3,36
			4,09	4,39
			5,29	6,02
			6,41	4,54
			3,52	3,20
			3,69	4,71
			3,39	5,47
			2,79	4,47
			5,72	5,63
			4,16	5,71
			4,31	6,35
			3,46	3,78
			4,13	2,80
			5,36	4,29
			3,25	3,84
			3,40	3,33
			2,00	3,46
			5,24	3,71
			4,56	2,99
			4,96	2,47
			3,53	3,95

			3,48	5,13
			2,15	3,89
			3,27	4,92
			2,37	5,43
			2,31	5,44
			4,44	5,19
			4,90	4,61
			6,70	4,76
			5,99	5,11
			5,70	5,11
			4,27	5,35
			4,82	5,15
			4,00	4,98
			3,35	3,90
			4,08	4,68
			3,25	5,51
			2,94	6,04
			8,19	8,19
			6,73	6,73
			7,08	7,08
			8,17	8,17
			7,89	7,89
			8,12	8,12
			9,14	9,14
			10,00	10,00
			9,35	9,35
			10,32	10,32
			7,35	7,35
			6,85	6,85
			10,26	10,26
			10,33	10,33
			9,59	9,59
			7,98	7,98
			6,57	6,57
			7,86	7,86
			9,56	9,56
			9,24	9,24
			9,87	9,87
			8,33	8,33
			8,67	8,67
			10,56	10,56
			9,27	9,27
			8,77	8,77
			9,38	9,38
			9,66	9,66
			8,16	8,16
			8,06	8,06
			6,70	6,70
			7,24	7,24
			10,71	10,71
			10,20	10,20
			11,06	11,06
			9,15	9,15
			11,63	10,65
			10,29	11,37
			10,88	10,73
			9,79	10,73
			8,77	13,46
			11,01	10,73
			9,85	10,73
			8,24	10,73
			7,35	13,70
			9,43	12,65
			8,46	10,92
			9,13	13,40
			9,55	7,68
			9,09	7,91
			8,25	10,83
			7,73	10,32

			6,98	10,73
			8,00	10,73
			11,83	9,47
			10,16	9,44
			9,80	11,47
			10,31	8,08
			8,31	10,16
			8,75	12,47
			9,14	8,80
			8,88	9,56
			11,15	13,37
			11,39	11,36
			8,63	11,64
			9,01	12,06
			10,16	10,73
			9,54	11,47
			9,87	8,98
			7,14	8,97
			7,38	9,92
			7,77	10,35
			6,94	12,21
			9,59	10,38
			9,61	10,95
			9,19	9,62
			9,72	7,80
			9,92	9,27
			6,10	10,25
			7,07	9,99
			6,18	12,56
			4,51	10,68
			4,79	9,38
			7,27	10,69
			8,18	7,74
			7,47	13,34
			7,81	10,70
			5,34	10,08
			4,95	10,21
14	0,70	6%	7,50	11,48
			7,43	10,97
			7,82	12,22
			8,31	16,97
			6,56	12,55
			7,13	11,65
			8,00	14,02
			9,74	10,14
			7,25	10,06
			6,79	10,85
			7,36	10,48
			7,23	10,94
			8,88	12,18
			8,38	9,33
			8,73	10,13
			8,92	13,34
			9,18	9,96
			9,01	9,89
			10,02	10,46
			9,67	8,39
			10,24	9,40
			11,10	7,69
			9,93	4,55
			9,71	3,82
			9,70	4,06
14	0,70	10%	9,94	8,60
			9,38	8,81
			9,53	8,70
			7,25	8,95
			6,83	7,09
			9,50	6,54
			8,64	9,25

			5,34	7,91
			9,45	7,13
			6,47	5,82
			6,93	5,80
			7,60	6,31
			3,65	6,42
			6,10	8,48
			7,12	9,42
			5,64	6,59
			4,56	4,58
			6,59	9,42
			6,82	6,82
			5,41	7,34
			6,25	9,15
			4,05	7,98
			13,77	6,23
			4,66	9,74
			7,33	5,56
			5,51	3,89
			3,92	5,97
			6,90	6,95
			3,70	6,81
			9,51	8,47
			6,00	6,19
			7,73	6,58
			5,37	5,68
			6,09	7,69
			5,21	5,72
			6,04	9,73
			10,11	6,69
			3,83	10,17
			4,68	7,80
			7,15	5,78
			6,62	5,37
			5,50	5,88
			6,24	6,49
			7,16	6,40
			4,51	8,37
			6,26	5,25
			6,53	5,72
			6,21	7,05
			7,36	6,54
			8,38	6,63
			6,62	8,72
			5,91	7,90
			6,41	5,71
			6,02	8,70
			4,97	6,13
			5,91	5,53
			5,77	6,10
			5,96	9,94
			6,33	6,47
			4,80	9,71
			5,12	5,97
			5,40	6,31
			5,62	6,35
			6,12	6,02
			6,12	8,00
			6,12	8,84
			6,12	7,53
			6,12	8,07
			6,12	8,23
			6,12	6,34
			6,12	6,83
			6,12	5,95
			6,12	6,46
			6,12	6,99
			6,12	6,69
28	0,55	6%		

28	0,55	10%	12,47	8,08
			5,55	9,00
			6,38	8,05
			5,53	6,84
			5,59	7,91
			5,07	6,58
			5,09	7,42
			3,51	4,56
			4,07	8,51
			6,56	5,57
			4,98	8,87
			3,90	5,31
			5,62	7,95
			8,53	6,85
			6,75	7,74
			4,67	7,41
			5,14	5,99
			7,54	9,51
			5,41	7,68
			6,00	6,99
			5,03	8,10
			4,59	3,21
			5,23	2,00
			7,65	2,72
			5,96	3,42
			8,07	5,48
			6,40	2,89
			5,24	3,63
3,24	5,49			
4,26	6,14			
7,62	6,99			
6,95	6,39			
5,00	8,53			
3,58	5,74			
7,13	4,67			
6,39	4,26			
28	0,70	0%	13,78	13,78
			13,85	13,85
			18,17	18,17
			12,04	12,04
			11,49	11,49
			15,93	15,93
			5,45	5,45
			4,32	4,32
			4,84	4,84
			15,82	15,82
			14,09	14,09
			12,30	12,30
			15,02	15,02
			18,54	18,54
			21,29	21,29
			17,05	17,05
			16,32	16,32
			20,87	20,87
			14,64	14,64
			14,49	14,49
			16,03	16,03
			15,59	15,59
			18,64	18,64
			17,73	17,73
			15,06	15,06
			16,27	16,27
			19,49	19,49
			16,06	16,06
18,41	18,41			
19,69	19,69			
13,34	13,34			
13,55	13,55			
14,07	14,07			

			13,86	13,86
			15,40	15,40
			17,19	17,19
			12,87	11,18
			15,73	11,18
			16,54	11,18
			13,70	11,18
			15,79	11,18
			15,68	11,18
			13,94	11,18
			17,35	11,18
			13,53	11,18
			13,53	11,18
			13,22	11,18
			16,64	11,18
			11,63	13,92
			10,68	14,46
			10,09	17,01
			7,23	17,94
			8,95	14,66
			8,71	18,52
28	0,70	3%	10,27	17,03
			10,87	19,94
			18,08	21,09
			12,55	14,39
			13,51	15,04
			14,29	17,26
			13,83	13,56
			14,29	15,54
			13,53	21,16
			16,96	15,69
			13,44	14,02
			9,66	21,58
			15,76	15,17
			13,94	14,65
			16,73	16,87
			14,95	16,02
			16,19	14,80
			12,31	22,12
			11,71	13,91
			10,25	15,77
			12,41	16,40
			10,85	16,48
			9,34	16,27
			10,37	17,94
			13,44	13,29
			12,41	16,40
			12,22	15,11
			12,18	16,40
			13,10	18,42
			11,44	15,17
			12,96	17,38
			12,67	16,70
			12,04	16,40
28	0,70	6%	9,09	14,59
			6,74	15,91
			9,17	17,71
			6,20	17,31
			7,92	14,68
			9,84	18,28
			14,60	15,38
			12,81	17,43
			14,40	16,96
			14,08	16,81
			13,91	18,59
			15,13	17,07
			12,89	14,09
			12,46	16,52
			13,64	15,43

			9,07	9,07
			8,53	8,53
			10,71	10,71
			8,49	8,49
			9,33	9,33
			12,20	12,20
			10,01	10,01
			10,92	10,92
			13,07	13,07
			7,51	10,20
			8,26	10,10
			8,79	10,54
			7,12	10,84
			3,87	9,35
			4,73	11,05
			8,96	12,60
			9,27	10,87
			10,12	11,43
			7,49	12,07
			8,25	11,58
			10,90	12,72
			8,26	5,71
			9,72	4,37
			11,39	6,48
			6,33	10,11
			3,07	10,12
			4,10	10,97
			9,74	10,45
			9,22	10,45
			9,30	11,60
			9,20	10,99
			6,97	10,13
			6,03	9,16
			7,35	10,44
			10,26	9,74
			8,36	8,61
			3,06	12,25
			3,48	9,6
			5,94	9,48
			9,81	10,40
			8,58	10,13
			9,39	11,75
			5,01	10,87
			3,25	10,86
			5,81	11,17
			6,74	9,77
			5,87	13,00
			5,43	16,31
			8,61	9,94
			10,40	10,24
			10,50	9,31
			6,68	10,94
			7,20	10,68
			9,33	12,02
			7,78	9,99
			6,42	12,04
			10,63	10,55
			9,97	10,00
			9,43	15,46
			9,08	13,41
			7,51	10,86
			6,11	10,34
			8,46	15,87
			5,78	13,50
			7,22	15,48
			6,79	11,19
			4,80	10,56
			6,04	10,11
			9,15	15,80

			0,00	6,09
			0,00	5,58
			0,00	4,06
			0,00	4,56
			0,00	3,93
			0,00	5,46
			0,00	5,96
			0,00	4,51
			0,00	4,17
			0,00	4,69
			0,00	3,54
			0,00	5,02
			0,00	6,61
			0,00	5,16
			0,00	3,91
			0,00	2,52
			0,00	3,05
			0,00	3,13
			0,00	4,37
			0,00	3,70
			0,00	2,35
			0,00	3,27
			0,00	2,28
			0,00	3,33
			0,00	3,13
			0,00	3,27
			0,00	5,26
			0,00	4,97
			0,00	2,67
			0,00	3,81
			0,00	3,27
			0,00	3,39
			0,00	2,41
			0,00	2,13
			0,00	4,45
			0,00	3,15
			0,00	3,27
91	0,40	10%	0,00	2,38
			0,00	3,53
			0,00	4,15
			0,00	5,19
			0,00	2,92
			0,00	3,27
			0,00	2,46
			0,00	3,1
			0,00	2,72
			0,00	1,87
			0,00	4,07
			0,00	3,38
			0,00	4,22
			0,00	2,18
			0,00	3,68
			0,00	2,23
			0,00	3,08
			0,00	2,7
			0,00	4,05
			13,36	13,36
			16,00	16,00
			17,46	17,46
			15,58	15,58
			9,08	9,08
			19,09	19,09
91	0,55	0%	11,18	11,18
			13,14	13,14
			13,94	13,94
			10,67	10,67
			11,20	11,20
			12,09	12,09
			9,16	9,16

			10,31	10,31
			13,74	13,74
			11,91	11,91
			11,86	11,86
			11,32	11,32
			12,40	12,40
			15,92	15,92
			10,85	10,85
			14,43	14,43
			12,93	12,93
			12,82	12,82
			9,66	9,66
			14,61	14,61
			12,34	12,34
			12,84	12,84
			16,40	16,40
			11,57	11,57
			11,65	11,65
			8,69	8,69
			12,39	12,39
			13,12	13,12
			12,47	12,47
			17,13	17,13
				15,60
			9,92	14,74
			11,38	13,90
			11,40	14,10
			11,71	13,64
			11,70	15,76
			16,96	15,92
			9,81	14,15
			12,32	16,24
			10,07	17,70
			3,91	14,25
			5,48	15,10
			8,64	16,10
			12,63	17,21
			11,93	14,32
			15,33	15,46
			12,50	14,33
91	0,55	3%	12,68	13,11
			14,22	12,13
			11,57	13,23
			12,98	14,73
			11,94	16,95
			11,45	17,02
			9,51	16,14
			15,24	15,02
			11,50	14,96
			11,50	14,31
			11,50	16,10
			11,50	16,23
			11,50	17,95
			11,50	14,12
			11,50	14,07
			11,50	11,13
			11,50	13,94
			11,50	13,27
				17,18
			10,12	15,70
			14,72	19,69
			8,43	12,60
			11,04	20,48
91	0,55	6%	9,92	14,17
			7,40	14,42
			4,76	15,67
			7,80	15,90
			8,30	12,93
			10,31	14,12

Apêndice 5: Resultados obtidos de carga passante no ensaio de penetração de cloretos.

Relação a/c	Teor (%)	Pigmento vermelho		Pigmento Verde	
		Carga passante (coloumbs)	Classificação de permeabilidade	Carga passante (coloumbs)	Classificação de permeabilidade
0,40	0	895,59	muito baixo	895,59	muito baixo
		810,90	muito baixo	810,90	muito baixo
	3	809,10	muito baixo	796,50	muito baixo
		668,79	muito baixo	799,02	muito baixo
	6	657,63	muito baixo	711,90	muito baixo
		801,00	muito baixo	724,30	muito baixo
10	938,97	muito baixo	752,04	muito baixo	
	947,70	muito baixo	779,40	muito baixo	
0,55	0	1198,80	baixo	1198,80	baixo
		1026,90	baixo	1026,90	baixo
	3	1154,70	baixo	1076,49	baixo
		1096,20	baixo	1104,20	baixo
	6	1315,80	baixo	1113,30	baixo
		1109,70	baixo	1113,30	baixo
10	1174,50	baixo	1188,90	baixo	
	1074,60	baixo	1201,42	baixo	
0,70	0	1766,52	baixo	1766,52	baixo
		1868,02	baixo	1868,02	baixo
	3	1906,20	baixo	1889,45	baixo
		1906,96	baixo	1901,70	baixo
	6	1603,96	baixo	1674,18	baixo
		1598,07	baixo	2178,36	moderado
10	1248,30	baixo	1755,98	baixo	
	1563,30	baixo	1849,44	baixo	

Apêndice 6: Resultados obtidos na análise da cor, através do espectrofotômetro.

Relação a/c	Teor (%)	Vermelho				Verde			
		L*	a*	b*	L*/a*	L*	a*	b*	L*/a*
0,40	0	86,26	0,85	5,12	102,03	86,26	0,85	5,12	102,03
		85,78	1,01	4,93	85,02	85,78	1,01	4,93	85,02
	3	47,55	21,83	13,29	2,18	68,15	10,03	11,83	6,79
		51,93	25,44	14,94	2,04	67,89	9,34	12,85	7,27
	6	44,35	24,75	14,52	1,79	65,01	12,14	13,15	5,35
		46,94	24,34	14,62	1,93	64,28	12,41	13,82	5,18
10	40,15	24,81	15,11	1,62	59,88	13,32	14,57	4,50	
	41,12	23,54	13,60	1,75	59,84	13,72	14,94	4,36	
0,55	0	87,85	0,88	5,19	99,46	87,85	0,88	5,19	99,46
		87,55	0,45	4,72	194,05	87,55	0,45	4,72	194,05
	3	53,44	25,27	14,99	2,12	72,95	8,93	11,09	8,16
		52,41	24,23	14,05	2,16	73,24	8,89	10,57	8,24
	6	49,46	26,50	17,39	1,87	67,41	10,66	13,06	6,32
		51,73	26,07	15,53	1,98	66,77	10,85	12,67	6,15
10	47,27	25,26	14,75	1,87	64,81	11,94	13,93	5,43	
	47,33	25,39	14,60	1,86	65,13	11,75	13,85	5,54	
0,70	0	90,63	0,38	4,42	235,72	90,63	0,38	4,42	235,72
		89,40	0,64	4,42	140,66	89,40	0,64	4,42	140,66
	3	56,24	21,16	12,81	2,66	71,46	8,84	10,94	8,08
		60,33	21,88	12,21	2,76	72,35	8,63	10,80	8,38
	6	54,72	23,69	11,69	2,31	67,82	10,76	12,72	6,31
		53,10	24,21	14,09	2,19	67,36	10,83	12,63	6,22
10	50,62	24,15	16,32	2,10	66,36	11,40	13,25	5,82	
	50,40	24,05	14,83	2,10	66,17	11,01	12,98	6,01	
análise do pó do pigmento		38,51	32,59	22,26	1,18	51,20	16,56	20,76	3,09
		38,67	31,94	21,94	1,21	50,52	16,38	20,30	3,08
		38,87	31,78	21,73	1,22	50,02	16,21	19,55	3,09