



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

ÉRIKA LIMA EVANGELISTA

CONCRETO COLORIDO A PARTIR DE ECOCIMENTO LC3

BELÉM

2019

ÉRIKA LIMA EVANGELISTA

CONCRETO COLORIDO A PARTIR DE ECOCIMENTO LC3

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Santos Barata

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Leal Eiró da Silva

BELÉM

2019

ÉRIKA LIMA EVANGELISTA

CONCRETO COLORIDO A PARTIR DE ECOCIMENTO LC3

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal do
Pará como requisito parcial para obtenção
de grau de Bacharel em Arquitetura e
Urbanismo.

Belém, 16 de Dezembro de 2019

Prof. Dr. Márcio Santos Barata
Dr. pela Universidade Federal do Pará (UFPA)
Orientador

Prof. Dr. Jorge Leal Eiró da Silva
Dr. pela Universidade Federal do Pará (UFPA)
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul da Silva Ventura Neto
Dr. pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Christianne Ferreira de Jesus
Arquiteta e Urbanista pela Universidade Federal do Pará (UFPA)

BELÉM
2019

“Os sonhos são projetados por nosso arquiteto interior, mas a realização está em nossas mãos.”

(Friedrich Nietzsche)

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Katiane e Eri, e à minha avó,
Edileuza.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por seu amor incondicional, por sua generosidade, por sempre me acolher nos momentos difíceis e por atender as minhas orações.

Agradeço aos meus pais, Eri e Katiane, e a minha avó, Edileuza, por sempre me incentivarem na busca pelo conhecimento, por todo amor e compreensão e por sempre me estimularem a dar o melhor de mim. Vocês são os melhores presentes de Deus na minha vida.

Agradeço a minha família, especialmente aos meus primos, Bia, Isabel, Moisés, João, Fabiana, e a minha irmã, Sarah, por compreenderem a minha ausência, pelas conversas e momentos de distração e por sempre vibrarem de alegria pelas minhas conquistas. Eu oro todos os dias para que sejam felizes em seus caminhos.

Agradeço aos meus amigos Lucas, Ícaro e Luiz por todas as piadas de tiozão e por me fazerem acreditar no meu potencial. A tríade, Amanda, Giulia e Leila, por sempre estarem de alto astral e dispostas à nos ajudarem. Às melhores companheiras de projeto, Brenda e Letícia, por me acolherem, pelos conhecimentos, pelas risadas (às vezes de desespero) e por sempre me fazerem acreditar que “vai dar tudo certo”. E a Kessily, a pessoa de coração mais puro, por me defender de pessoas idiotas e por sempre me apoiar, até mesmo nas ideias mais malucas.

Agradeço ao mestrando Euler pelo auxílio durante a pesquisa e por compartilhar seu conhecimento.

E agradeço ao meu orientador, Dr. Márcio Barata, que despretensiosamente plantou uma sementinha quando eu ainda estava meio perdida e meio deslumbrada com o curso. Hoje essa sementinha deu os seus primeiros frutos.

Obrigada à todos que chegaram até aqui ao meu lado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	22
1.4	OBJETIVOS	22
2	CIMENTO LC³	23
2.1	IMPACTOS AMBIENTAIS DO CIMENTO PORTLAND	23
2.2	SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER	24
2.3	INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS	26
3	CONCRETO CROMÁTICO	28
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
3.2	MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO CROMÁTICO	33
3.2.1	Cimento Portland branco estrutural	33
3.2.2	Agregados	36
3.2.3	Aditivos	37
3.2.4	Pigmentos.....	38
3.2.5	Adições minerais	41
3.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO CROMÁTICO	44
3.3.1	Considerações iniciais.....	44
3.3.2	Etapas de produção	45
3.3.3	Proteção superficial	47
3.3.4	Custos	48
3.4	CORES, FORMAS E TEXTURAS DO CONCRETO CROMÁTICO.....	51
3.5	COLORIMETRIA.....	56
3.6	EFLORESCÊNCIA.....	60

4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
4.1	ESTRATÉGIA DA PESQUISA.....	62
4.2	SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA.....	64
4.3	PRODUÇÃO DAS MISTURAS	65
4.4	ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....	70
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
5.1	ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	84
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
6.2	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Biblioteca Municipal da cidade de Viana do Castelo, Portugal.	13
Figura 2: Pavilhão da Expo'98, em Lisboa, Portugal.	14
Figura 3: Hotel Unique, São Paulo.	14
Figura 4: Igreja São Francisco de Assis da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais.	15
Figura 5: Centro de Reabilitação Pediátrica Sarah Belém (PA).	15
Figura 6: Centro de Reabilitação Sarah Kubitschek Lago Norte, Brasília/DF. .	16
Figura 7: Convento Sainte-Marie de La Tourette, Éveux, França.	18
Figura 8: Influência do cimento na cor final.	19
Figura 9: Deposição dos resíduos caulíníticos em lagoas de sedimentação. ...	21
Figura 10: Fábrica “The Carreras Black Cat”, Londres, Inglaterra.	29
Figura 11: Edifício Flextronics, Sorocaba, São Paulo.	30
Figura 12: The Retirement Systems of Alabama Tower Office Building, Montgomery, EUA.	30
Figura 13: Igreja Dives in Misericordia, Roma, Itália.	31
Figura 14: Barreiras de concreto branco e cinza.	35
Figura 15: Mancha por oxidação em concreto branco.	46
Figura 16: (a) Placa de concreto; (b) Ripas de concreto; (c) Amostras de placas de granilite.	49
Figura 17: (a) Edifício Art and Architecture Building, Universidade de Yale, Connecticut, Estados Unidos. (b) Detalhe da textura aplicada a fachada do edifício.	51
Figura 18: (a) Edifício do Museu Schaulager, Newmünchenstein, Suíça, 2003. (b) Detalhe da textura aplicada a fachada do edifício.	52
Figura 19: Amostras de concreto com agregado exposto.	52
Figura 20: Concreto fotogravado na fachada do edifício da Université Paul Sabatier em Toulouse, França.	53
Figura 21: Concreto estampado em textura de ripas de madeira.	53
Figura 22: Piso intertravado de concreto colorido.	54
Figura 23: Telhas de concreto colorido.	54

Figura 24: (a) Roda das cores; (b) Mudanças em luminosidade e saturação, do vermelho-violeta ao verde; (c) Adjetivos relacionados às cores para luminosidade e saturação.....	57
Figura 25: (a) Representação de um sólido de cor no Espaço de Cor $L^*a^*b^*$; (b) Mudanças em luminosidade e saturação, do vermelho-violeta ao verde.....	59
Figura 26: Eflorescência em blocos de concreto colorido.	60
Figura 27: Paleta de cores baseada nos tons da cidade de Belém.	62
Figura 28: Fluxograma esquemático do programa experimental.	63
Figura 29: a) Materiais utilizados; b) Mistura do cimento com os pigmentos; c) Após adição de água; d) Após adição de areia.	66
Figura 30: a) Materiais utilizados; b) Mistura do cimento com os pigmentos; c) Adição de metacaulim e calcário; d) Após adição de água; e) Após adição de areia.....	67
Figura 31: a) Fôrma de madeira com desmoldante e malha metálica; b) Pilão metálico.	68
Figura 32: a) Espátula de aço (colher de pedreiro); b) Placa de madeira; c) Posicionamento da palha sobre a argamassa.....	69
Figura 33: Estúdio produzido pela autora.	71
Figura 34: a) LC^3 com pigmentos amarelo e marrom, textura lisa; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e marrom, textura lisa.	73
Figura 35: a) LC^3 com pigmentos amarelo e marrom, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e marrom, textura ripada.....	73
Figura 36: a) LC^3 com pigmentos amarelo e marrom, textura de bambu; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e marrom, textura de bambu.	74
Figura 37: a) LC^3 com pigmentos amarelo e preto, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura lisa.....	75
Figura 38: a) LC^3 com pigmentos amarelo e preto, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura ripada.	75
Figura 39: a) LC^3 com pigmentos amarelo e preto, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura de bambu.....	76
Figura 40: a) LC^3 com pigmentos amarelo e vermelho, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura lisa.	77
Figura 41: a) LC^3 com pigmentos amarelo e vermelho, textura ripada; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura ripada.	78

Figura 42: a) LC ³ com pigmentos amarelo e vermelho, textura de bambu; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura de bambu....	78
Figura 43: a) LC ³ com pigmentos vermelho e marrom, textura lisa; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos vermelho e marrom, textura lisa.....	79
Figura 44: a) LC ³ com pigmentos vermelho e marrom, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e marrom, textura ripada.	80
Figura 45: a) LC ³ com pigmentos vermelho e marrom, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e marrom, textura de bambu.	80
Figura 46: a) LC ³ com pigmentos vermelho e preto, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura lisa.....	82
Figura 47: a) LC ³ com pigmentos vermelho e preto, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura ripada.	82
Figura 48: a) LC ³ com pigmentos vermelho e preto, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura de bambu.....	83

RESUMO

O cenário da arquitetura contemporânea demonstra a busca por materiais inovadores que atendam demandas de durabilidade, resistência, economia, beleza e sustentabilidade. Neste contexto, arquitetos exploram o uso do concreto cromático, de modo que um elemento estrutural torna-se também um elemento estético. O concreto cromático pode ser produzido com cimento Portland branco ou cimento Portland convencional, porém o cimento Portland branco apresenta custo mais elevado e o cimento Portland convencional possui reduzida capacidade de pigmentação. Uma alternativa mais viável para a produção do concreto cromático seria o uso de LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), um material que substitui parcialmente o cimento por adições minerais, como o calcário e o metacaulim. O LC³ além de apresentar menor custo em relação ao cimento Portland branco, também pode oferecer maior capacidade de pigmentação do que o cimento Portland convencional. Outro benefício do LC³ é a diminuição de liberação de gás carbônico, devido a menor quantidade de clínquer na sua composição. Neste sentido, a presente pesquisa buscou avaliar comparativamente o desempenho colorimétrico do LC³ em relação ao cimento Portland convencional, este estudo foi realizado a partir da análise dos parâmetro L*a*b* em conjunto com a avaliação visual da cor. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram-se bastante satisfatórios, uma vez que os parâmetros alcançados demonstraram que a diferença total de cor entre as placas de LC³ e cimento Portland convencional (CPIIF40) é bastante acentuada, sendo facilmente percebida em uma simples avaliação visual. O LC³ também mostrou-se eficaz no combate a eflorescência, reduzindo a porosidade superficial das placas. Também foram analisadas as variações entre as texturas (lisa, ripada e de bambu), indicando que superfícies mais rugosas tendem a escurecer a cor do material.

Palavras-chave: Concreto cromático; LC³; Texturas; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The contemporary architecture scenario demonstrates the search for innovative materials that meet the demands of durability, load, economy, beauty and sustainability. In this context, architects explore the use of chromatic concrete, so that a structural element also becomes an aesthetic element. Chromatic concrete can be produced with white Portland cement or conventional Portland cement, but white Portland cement has a higher cost and conventional Portland cement has reduced pigment capacity. A more viable alternative for chromatic concrete production would be the use of LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), a material that partially replaces cement with mineral additions such as limestone and metakaolin. In addition to its lower cost compared to white Portland cement, LC³ can also offer greater pigment capacity than conventional Portland cement. Another benefit of LC³ is the reduction of carbon dioxide release due to the lower amount of clinker in its composition. In this sense, the present research aimed to comparatively evaluate the colorimetric performance of LC³ in relation to conventional Portland cement. The results obtained in this research were very satisfactory, since the achieved parameters demonstrated that the total color difference between the LC³ and conventional Portland cement (CPIIF40) plates is quite sharp, being easily noticed in a simple visual evaluation. LC³ was also effective in combating efflorescence, reducing the surface porosity of the plates. Variations between textures (smooth, slatted and bamboo) were also analyzed, indicating that rougher surfaces tend to darken the color of the material.

Keywords: Chromatic concrete; LC³; Textures; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Novas demandas tecnológicas vem sendo impostas em todo o mundo, tornando-se imprescindível a modernização de processos e produtos. O setor da construção civil não fica fora destas questões e busca realizar melhorias por meio do desenvolvimento de novos materiais a serem aplicados nas obras, visando avanços estéticos e funcionais. Neste cenário de inovação, o cimento branco entra no mercado como um diferencial nos projetos de arquitetura e engenharia, trazendo a utilização dos sistemas estruturais como um elemento estético de alto potencial.

Este material ainda possibilita a produção de concretos cromáticos de diversas cores e texturas, agregando ainda mais valor estético ao projeto. E pode ser utilizado nos mais diversos tipos de obras, sejam elas arquitetônicas, como edifícios residenciais e comerciais, ou urbanísticas, como demarcação de vias e pisos intertravados (HARTMANN; BENINI, 2011).

Na Europa o cimento branco é amplamente explorado, as obras mais conhecidas estão registradas em nomes de arquitetos renomados como Álvaro Siza Vieira, arquiteto da Biblioteca de Viana do Castelo (Figura 1) e do Pavilhão da Expo'98 (Figura 2).

Figura 1: Biblioteca Municipal da cidade de Viana do Castelo, Portugal.



Fonte: <https://www.radiogeice.com/fm/2019/07/23/biblioteca-municipal-de-viana-do-castelo-vai-encerra-para-obras/>

Figura 2: Pavilhão da Expo'98, em Lisboa, Portugal.



Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/tag/expo-98>

No Brasil, a utilização do concreto aparente, principalmente o concreto cromático, ainda enfrenta forte resistência, principalmente pela necessidade de importação de cimento Portland branco, elevando ainda mais o custo final do material. No entanto, arquitetos como Ruy Ohtake e Oscar Niemeyer inseriram cor, textura ou formas com maestria ao concreto, mostrando toda a beleza e versatilidade do material, suas obras mais conhecidas são o Hotel Unique (Figura 3), em São Paulo e a Igreja São Francisco de Assis (Figura 4) na Pampulha, em Belo Horizonte, respectivamente (HARTMANN; BENINI, 2011).

Figura 3: Hotel Unique, São Paulo.



Fonte: <https://www.booking.com/hotel/br/unique.pt-br.html>

Figura 4: Igreja São Francisco de Assis da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais.



Fonte: <https://www.trover.com/d/1GZku-capela-curial-de-s%C3%A3o-francisco-de-assis-belo-horizonte-brazil>

Além das aplicações em concreto, o cimento foi explorado pelo arquiteto João Filgueiras Lima, o Lelé, na produção de componentes pré-fabricados em argamassa armada visando a racionalização do processo construtivo. Lelé tornou-se referência no uso da argamassa armada principalmente com o desenvolvimento de projetos para a Rede Sarah, por meio do Centro de Tecnologia da Rede Sarah (CTRS), os hospitais da Rede Sarah estão presentes em diversas localidades do país, como São Luís (1993), Salvador (1994), Belo Horizonte (1997), Fortaleza (2001), Macapá (2005), Belém (2007) e Rio de Janeiro (2009).

Figura 5: Centro de Reabilitação Pediátrica Sarah Belém (PA).



Fonte: <http://ceres.sarah.br/dimensaometacognitiva/Pages/05a-BEL.html>

Figura 6: Centro de Reabilitação Sarah Kubitschek Lago Norte, Brasília/DF.



Fonte: <https://domvalente.com.br/rede-sarah-kubitschek-referencia-em-reabilitacao/>

As diversas variações de cor, como vermelho, amarelo, verde, marrom e preto tornam o concreto cromático um atrativo para a construção civil. No entanto, especialmente no Brasil, ainda é muito difícil e de alto custo a produção deste material por não existir uma padronização, requerendo a execução de testes laboratoriais ou conhecimentos baseados em experiências estrangeiras para conseguir alcançar a cor e tonalidade desejada (HARTMANN; BENINI, 2011). Neste sentido, pesquisadores de todo o mundo, vem tomando a iniciativa de avaliar as variações cromáticas do material ao longo do tempo quando expostas às intempéries. Os maiores problemas do concreto cromático são o alto custo de produção e a manutenção das características cromáticas ao longo do tempo. O cimento Portland branco custa cerca de três vezes mais que o cimento Portland cinza e a cor no concreto sofre alterações ao interagir com os agentes externos ambientais como vento, chuva, insolação entre outros aspectos do intemperismo.

O cimento Portland cinza, devido a sua grande variabilidade, menor custo – em relação aos demais materiais – e qualidade do concreto armado, é amplamente utilizado na Construção Civil, seja por mão-de-obra especializada ou por “auto-construtores”. No entanto, segundo Gartner e Hirao (2015), a produção do cimento Portland é responsável pela emissão de cerca de 5% de CO₂ no mundo, um dos Gases do Efeito Estufa – GEE’s.

Em busca de materiais que atendessem as demandas atuais de sustentabilidade e mantivessem o desempenho do cimento Portland convencional, foi desenvolvido o chamado LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*). Neste novo material, o clínquer – responsável pela maior porcentagem de liberação de CO₂ - pode ser substituído em grandes percentuais por fíler calcário e argila calcinada, materiais de menor emissão de CO₂ durante a produção (LINS, 2017). Estas adições, dependendo da origem da matéria-prima utilizada, também permitem que o cimento LC³ seja mais claro do que o cimento Portland convencional, tornando-o uma solução viável na produção de concreto cromático, diminuindo custos e agregando valores de sustentabilidade. Além disto, este tipo de cimento melhora a qualidade estética do concreto colorido produzido a partir dele. Devido ao maior teor de finos e de pozolanas, o cimento LC³ reduz significativamente a eflorescência, porque o hidróxido de cálcio é removido da pasta de cimento. A eflorescência são manchas brancas comuns nos cimentos Portland, que desvalorizam o concreto colorido.

1.2 JUSTIFICATIVA

O uso do concreto aparente ganhou força com o Modernismo, movimento arquitetônico que prima a originalidade dos materiais. A sua imagem heterogênea foi bastante explorada por arquitetos que buscavam a expressão brutalista do material, mas também houve quem quisesse explorar a variação de formas conseguidas com a cofragem do concreto, como Le Corbusier, no Convento Sainte-Marie de La Tourette (Figura 7), na França pós Segunda Guerra Mundial (GOMES, 2015).

Figura 7: Convento Sainte-Marie de La Tourette, Éveux, França.



Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/401875966725832098/?lp=true>

A sua capacidade de se modelar e gerar diferentes formas e texturas também tem atraído os olhares dos arquitetos contemporâneos. Todavia, a cor cinza já não é mais suficiente para a implementação deste material nas construções. A adição de pigmentos agrega muito mais valor às obras arquitetônicas, além de tirar a monotonia do cinza e somar-se as diferentes texturas do material. Com o surgimento do concreto branco, as possibilidades foram aumentadas e são amplamente exploradas. No entanto, devido ao elevado custo para a produção do concreto cromático (KIRCHHEIM *et al.*, 2011), os arquitetos e engenheiros brasileiros tem optado pela produção deste material através da utilização de cimento cinza ao invés do cimento branco.

As tonalidades alcançadas com essa substituição tem agradado muitos arquitetos e clientes, principalmente em São Paulo, devido a tonalidade mais clara do cimento cinza produzido na região (SOLUÇÕES, 2018). Todavia, embora esta mistura venha sendo utilizada em São Paulo por uma questão particular da matéria prima de fabricação do cimento cinza, ainda é presente o anseio pela produção do concreto cromático com tonalidades mais vivas, aproximando-se das cores reais dos pigmentos empregados na mistura e a busca por uma solução mais ampla e não restritiva, local, associada à presença da matéria prima mais alva. A título de informação, ao empregar o cimento branco no concreto cromático, as cores ficam mais vivas em relação ao cimento cinza convencional (Figura 8).

Figura 8: Influência do cimento na cor final.



Fonte: <https://docplayer.com.br/59149044-A-influencia-de-pigmentos-nas-propriedades-de-argamassas-de-cimento-portland.html>

O concreto cromático, por tratar-se de um material relativamente novo no mercado, ainda apresenta algumas questões que dificultam a sua utilização, como a instabilidade da cor, resistência e durabilidade, além do custo. Na academia, são recorrentes os estudos que debatem a resistência à compressão do concreto, avaliando as interações entre os materiais constituintes e a influência das adições nesta propriedade. Mas ainda são relativamente poucos os estudos direcionados a avaliar a durabilidade cromática do concreto, analisando a sua exposição ao intemperismo e buscando medidas para mitigar a eflorescência, patologia recorrente no concreto cromático. Neste sentido, o presente trabalho busca avaliar novas possibilidades de produção do concreto cromático em diferentes cores e texturas empregando o cimento LC³ como um

meio de diminuição de custos, melhoria das cores (mais intensas e duráveis) e mitigação dos impactos ambientais ocasionados pela indústria cimenteira.

O cimento LC³, por ser um material que substitui cerca de 50% do clínquer empregado na produção de cimento Portland convencional, por adições de fíler calcário e argila calcinada, diminui a liberação de CO₂ na atmosfera, além de possibilitar um material mais claro devido à alvura destas adições, permitindo alcançar tonalidades mais vivas no concreto cromático e com menor custo quando comparado ao cimento Portland branco. Outra vantagem advinda do uso do cimento LC³ para a produção de concreto cromático é a maior resistência do material em relação ao cimento Portland convencional (LINS, 2017). No Brasil, por exemplo, as adições minerais já são usadas para a produção de diferentes cimentos, diminuindo 0,83 milhões de toneladas de CO₂ no ano de 2013 (BATTAGIN, 2016).

No presente trabalho, a argila calcinada a ser utilizada para a produção do cimento LC³ será proveniente do resíduo do beneficiamento de caulim (RBC) no estado do Pará, o qual é derivado de argila caulinítica de alta pureza empregado na produção de revestimento na indústria do papel. Em decorrência da sua composição à base de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), apresenta excelentes características pozolânicas e, dependendo da granulometria obtida, também proporciona efeito fíler ao material (PASSUELO, 2004).

A escolha pela substituição da argila calcinada comum pelo RBC local está baseada nos estudos de Lins (2017), no qual a autora expõe resultados positivos na resistência provenientes do emprego de uma argila de alta pureza, além de vantagens estéticas para o concreto cromático. Neste sentido, é importante ressaltar que a região norte, principalmente o estado do Pará, possui grande reserva de material com potencial para produção de metacaulim (BARATA, 2007), agregando, além de melhor resistência do cimento LC³ (LINS, 2017), menor custo de produção, maior alvura e redução dos impactos ambientais gerados pela deposição dos resíduos do beneficiamento de caulim no meio ambiente. Estima-se que cerca de 15 milhões de toneladas do RBC estejam depositadas em barragens no Estado do Pará.

Figura 9: Deposição dos resíduos caulíníficos em lagoas de sedimentação.



Fonte: BARATA, 2007 apud. CABRAL, 1991.

1.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A matriz experimental da pesquisa foi reduzida, devido as limitações de tempo e complexidade dos estudos intrínsecos ao trabalho de conclusão de curso. Desta forma, decidiu-se produzir argamassas cromáticas ao invés do concreto cromático. Esta escolha deu-se pela dificuldade logística enfrentada para a produção de concreto nas dependências da universidade. Embora se tenha conhecimento da influência de agregados graúdos nas propriedades colorimétricas do produto final, sabe-se que a escolha de agregados de cor clara o afetam com menor intensidade. Ademais, para evitar interferências dos agregados graúdos também deve-se adotar uma massa de cobrimento mais espessa.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é avaliar comparativamente as propriedades colorimétricas do cimento LC³ em relação ao cimento Portland (CP II F 40) a partir da produção de argamassas com adição de pigmentos.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a) Desenvolver uma paleta de cores em tons terrosos por meio da mistura de pigmentos com dois cimentos, o CP II F 40 e o LC³ 50;
- b) Comparar parâmetros estéticos de cor ($L^*a^*b^*$) e diferença total de cor (ΔE) de argamassas coloridas produzidos a partir de cimento Portland convencional cinza (CP II F 40) e o cimento LC³;
- c) Experimentar diferentes texturas como possibilidades para aplicação em concreto cromático a partir de distintos tipos de cofragem.

2 CIMENTO LC³

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO CIMENTO PORTLAND

Estudos recentes apontam que a indústria cimenteira é responsável por cerca de 7% das emissões de gás carbônico (CO₂), um dos Gases de Efeito Estufa - GEE's, liberado no processo de fabricação do cimento (IEA/WBSCD, 2018). A alta concentração deste gás na atmosfera foi pauta da Conferência Mundial das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas - COP 21, na qual foram estabelecidos os níveis de redução dos GEE's até 2100, visando manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C.

Para garantir estas reduções as indústrias de todo o mundo precisarão renovar suas tecnologias, entre elas as produtoras de cimento. Segundo Isakkison (2016), estas reduções devem ser de pelo menos 72% até 2050 e 118% até 2100, com base no Representative Concentration Pathways 2.6 divulgado pelo International Panel for Climate Change (IPCC) de 2013.

Antes da COP 21, diversos pesquisadores já discutiam possíveis estratégias para a redução da emissão de CO₂, buscando novos materiais para a produção de cimento. A Agência Internacional de Energia e o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (IEA/WBCSD) desenvolveram um roteiro para reduzir as emissões de CO₂ em até 18% no setor cimenteiro, considerado imprescindível para atingir a meta global até 2100 (CEMBUREAU, 2015).

Entre as medidas a serem estabelecidas pelo Programa Ambiental das Nações Unidas para a Construção Sustentável e Clima (UNEP-SBCI), visando alcançar esta redução mínima, estão o uso de materiais suplementares cimentícios e a redução do conteúdo de clínquer aliado ao uso de misturas de melhor preenchimento e, conseqüentemente, melhor resistência. Neste sentido, para produzir um material mais sustentável e ao mesmo tempo com boas características de resistência e durabilidade, as pesquisas devem buscar analisar a trabalhabilidade do concreto fresco, prever os tamanhos das partículas com métodos mais efetivos e estabelecer a relação da vida útil e a quantidade de CO₂ presente no produto final (SCRIVENER *et al.*, 2018).

2.2 SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER

As adições minerais preservam as características mecânicas do cimento Portland comum ao mesmo tempo que reduzem a quantidade de CO₂ liberado e de resíduos despejados no meio ambiente, uma vez que as principais adições utilizadas são provenientes de rejeitos das indústrias mineradoras. Estas adições são compostas por material inorgânico, de finura igual ou menor que a do cimento e podem ser divididas em dois grupos, as quimicamente ativas e as quimicamente inativas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais quimicamente ativas são divididas em materiais cimentantes, aqueles que não prescindem do hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂ – para a formação de compostos aglomerantes hidratados, como a escória de alto-forno. E materiais pozolânicos, aqueles que formam compostos resistentes a partir da reação química com o hidróxido de cálcio na presença de água, como a cinza volante e as argilas calcinadas (GOBBI, 2014). Já o grupo das adições minerais quimicamente inativas é composto por fíleres, como o fíler calcário, fíler quartzo e pó de areia. O fíler calcário, segundo Scrivener (2014), quando misturados com outras adições minerais, podem contribuir com a resistência mecânica do concreto.

No Brasil materiais como a cinza volante e a escória de alto forno já são utilizadas na fabricação de diversos tipos de cimentos, como CP II-E, CP II-Z, CP III e CP IV (OLIVEIRA *et al.*, 2014), contribuindo significativamente para a redução da emissão de CO₂ no país (BATTAGIN, 2016). Porém, a substituição do clínquer por adições minerais ainda enfrenta algumas adversidades, como a disponibilidade dos materiais e as variações de qualidade conforme a origem da matéria-prima. Entre os diversos materiais testados, a argila calcinada é a mais apropriada devido a sua abundância e aspectos técnicos proferidos ao material final (SCRIVENER, 2014).

Os pesquisadores Bishnoi *et al.* (2014), Scrivener (2014), Andrés *et al.* (2015), entre outros, mostraram em seus experimentos que a argila calcinada quando misturada com fíler calcário produz o carboaluminato (3CaO.Al₂O₃.CaCO₃.11H₂O) por meio de uma reação sinérgica, este produto colabora positivamente no desempenho mecânico do concreto devido o

preenchimento de vazios (SCRIVENER, 2014). Esta mistura ternária de argila calcinada, fíler calcário e cimento é denominada de LC³ (*Limestone calcined clay cement*), e, segundo Scrivener (2018), pode chegar a substituir até 55% do clínquer, sem prejudicar a resistência do concreto e ainda melhorar a sua durabilidade.

A partir de estudos realizados em Cuba e pelo Instituto Indiano de Tecnologia (IIT) de Madras mostrou-se que o LC³-50 reduz em 30% as emissões de CO₂ quando comparado ao cimento Portland comum e cerca de 10% em relação ao cimento Portland pozolânico produzido com cinza volante utilizado como referência nas pesquisas apresentadas. Esta mistura ternária mostrou-se muito mais eficaz quando comparada a misturas binárias, separando o fíler calcário e a argila calcinada (SCRIVENER *et al.*, 2017).

A combinação dos três materiais oferece maior proteção da armadura, desempenho positivo quando há presença de sulfatos, mitigação da reação álcali-agregado com agregados reativos, ótima resistência à penetração de cloretos e carbonatação similar aos demais cimentos com adições minerais (SCRIVENER *et al.*, 2018). O material também atende a requisitos econômicos, como a disponibilidade de matérias-primas e o baixo custo de investimento, devido à similaridade com a produção do cimento Portland comum, exigindo poucas alterações do sistema utilizado (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2016), foram produzidas cerca de 36 milhões de toneladas de caulim no mundo, referente ao ano de 2015. O Brasil foi classificado pela United States Geological Survey (USGS) como o sétimo produtor do mundo, com 1,8 Mt produzidos, dando destaque para os estados do Amapá, Pará e Amazonas (DNPM, 2016).

Nas regiões do Rio Jari e do Rio Capim concentram-se as principais jazidas de caulim no estado do Pará, exploradas principalmente pela empresa francesa Imerys S.A. O beneficiamento do caulim gera cerca de 10 milhões de toneladas de rejeito por ano, as quais não possuem destino certo e causam grandes problemas de vazamento, devido ao transbordamento na época de chuvas intensas ou problemas no próprio mineroduto (BARATA; ANGÉLICA, 2012).

2.3 INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS

A argila calcinada com apenas 40% de caulinita quando usadas na mistura do LC³ já apresentam propriedades mecânicas similares ao cimento Portland de referência na idade 7, segundo pesquisa realizada pela Escola Politécnica Federal de Lausana (EPEL – Suíça) e coordenada por Alujas e Avet (2015), ainda não publicada oficialmente (AVET *et al.*, 2016). A argila caulinítica é levada a um forno, no qual é aquecida a 700/850°C, ocorrendo a calcinação do material. Este processo gera uma desordem na sua estrutura cristalina, criando um novo material, o metacaulim¹.

O metacaulim é constituído principalmente por aluminossilicato amorfo ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que reage com o hidróxido de cálcio resultando em um aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e hidratos de aluminato, além da produção de hidratos de carboaluminato, devido à presença de carbonato de cálcio e alumina. Estes produtos são responsáveis pela maior resistência e durabilidade do concreto produzido com o LC³, devido a sua menor densidade. No entanto, a elevada finura da argila pode gerar aumento na demanda de água ou de aditivos superplastificantes, a fim de evitar este efeito o clínquer deve ser moído antes de mistura-lo com argila calcinada e calcário.

A durabilidade do concreto produzido a partir de LC³ é elevada quanto maior for o teor original de caulinita da argila calcinada, pois assim, aos 28 dias, as pastas produzidas com LC³ apresentam uma estrutura de poros mais refinada do que as de cimento Portland comum, além de protegerem as armaduras contra a corrosão ocasionada pela entrada de cloreto na estrutura (SCRIVENER, 2017).

O LC³ também pode ser considerado um material de baixo custo, quando comparado a outros tipos de cimento com adições minerais, e consideradas a disponibilidade local e preço de aquisição (JOSEPH; BISHNOI, 2015). Ademais, a grande disponibilidade de argila em todo o mundo e o baixo custo do calcário, compensam o custo mais elevado da calcinação da argila (ANTONI *et al.*, 2012).

O Brasil, principalmente o estado do Pará, possui grande reserva de argilas e, em específico, a indústria do município de Barcarena, vem despejando cerca de meio milhão de toneladas por ano de caulim na forma de lama, prescindindo

¹ O prefixo meta em grego significa “novo”, assim, o metacaulim é uma nova forma do caulim após a calcinação do material.

de uma destinação sustentável (BARATA, 2007). A grande disponibilidade de argila caulinítica no estado do Pará, a logística de transporte e emprego do material, podem tornar a produção do LC³ mais barata na região, além de contribuir para um destino ambientalmente correto do resíduo do beneficiamento do caulim (RBC) depositados na região do município de Barcarena. Outro fator que contribui para o uso do LC³ no Brasil, é o lançamento da ABNT NBR 16697 de 2018, que permite a aplicação de até 10% de fíler calcário em conjunto com até 50% de pozolana.

As adições minerais, além de influenciarem as características mecânicas do concreto cromático, também tem impacto direto na cor do material devido a sua finura, devendo-se atentar para o tipo de adição selecionada e o teor de substituição aplicado ao concreto. As adições, sejam elas quimicamente ativas ou inativas, possuem índices de refletância diferenciados entre si dependendo da origem da matéria-prima e do seu processo de obtenção, sendo que, quanto maior for o valor de refletância da adição, menor será o impacto na cor do produto final. As adições de sílica ativa, por exemplo, tendem a cores mais acinzentadas e podem prejudicar a estética do concreto, tanto o branco quanto os coloridos, diminuindo a intensidade da cor original do pigmento. Já as adições de metacaulim, quando obtidas da calcinação da argila caulinítica, tendem a uma cor mais alaranjada, no entanto, quando obtidas por meio da calcinação do resíduo do beneficiamento do caulim (RBC), proferem cores mais claras ao concreto, implicando em aspectos positivos para a produção do concreto cromático a partir deste material (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

3 CONCRETO CROMÁTICO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cimento Portland não foi bem aceito em construções na sua primeira apresentação em 1824, por Joseph Aspdin, sendo considerado um material de cunho artesanal. No entanto, na segunda metade do século XIX, após muitas experimentações e com o advento da fotografia², o material passa a ser visto com outros olhos por arquitetos e engenheiros. Neste contexto, as construções tradicionais, como igrejas, palácios e escolas, cedem espaço para uma nova tradição industrial, com destaque para a construção de reservatórios e armazéns, buscando aproveitar as possibilidades formais e estruturais do concreto. Mais adiante, não conformados com a simplicidade única do concreto, arquitetos, como o inglês Arthur Blomfield, passaram a pesquisar possibilidades de texturas e cores para o material, conferindo a este um intenso potencial sensorial, mas não dissociado das suas características técnicas (GOMES, 2015).

O uso do concreto cromático iniciou-se na década de 1920, na Inglaterra, quando a empresa G. & T. Ltda produziu o primeiro cimento colorido e a empresa Art Pavements & Decorations inseriu cor em peças de concreto pré-moldado. No entanto, a primeira obra realizada com concreto cromático data de 1928, na fábrica “The Carreras Black Cat” (Figura 10), a tecnologia aplicada nesta obra não é mais utilizada, mas ressalta a influência dos materiais constituintes da mistura, uma vez que na obra foi utilizada areia em tom ocre da África do Sul, obtendo um concreto de tonalidade amarelada. Após a realização desta obra, somente na década de 1980 o concreto cromático voltou a ser utilizado, nos Estados Unidos, devido à expansão do uso de cimento branco, abrindo as portas para novas tecnologias de pigmentação do concreto (COELHO, 2001).

² Antes da fotografia a divulgação do concreto era realizada por meio da imprensa, no entanto, o que era exposto dependia da visão do autor do artigo acerca do material. Com a chegada da fotografia foi possível a visualização da beleza e robustez do concreto, a exemplo da exposição realizada por um engenheiro francês (Aimé Bonna) em 1889, para a divulgação da sua invenção - tubos de concreto armado (GOMES, 2015).

Figura 10: Fábrica “The Carreras Black Cat”, Londres, Inglaterra.



Fonte: <https://greatacre.wordpress.com/2015/02/21/the-carreras-cigarette-factory/>

No Brasil, o concreto cromático ganhou destaque na utilização de pavimentos intertravados, conhecidos como “*pavers*”, conferindo maior atratividade a parques, praças e vias, por meio de desenhos e cores adicionadas ao pavimento, também são comuns os pisos de alta resistência moldados *in loco*, como o calçadão de Ribeirão Preto, projetado em 2002 (TECNOLOGIA DO CONCRETO ARMADO, 2002). No país, o primeiro projeto executado a utilizar o concreto armado com base de cimento branco, foi o Edifício Flextronics (Figura 9), elaborado pelo escritório Sidonio Porto, na cidade de Sorocaba, São Paulo, no ano de 1998. Posteriormente, em 2001, iniciou-se o projeto do Museu Iberê Camargo, realizado pelo arquiteto português Álvaro Siza, o qual fez uso do concreto branco e conferiu maior visibilidade ao material no território brasileiro (AGUIAR, 2006). No mesmo período outros projetos utilizando o concreto cromático foram executados, revelando a sua beleza e aceitação entre os arquitetos nacionais, entre as obras mais conhecidas estão a Ponte Irineu Bornhausen na cidade de Brusque (SC), o Edifício e-Tower³ e o Hotel Unique, em São Paulo (SP).

³ O concreto cromático foi utilizado nos pilares da garagem do Edifício e-Tower, visando diferenciar o tipo de concreto aplicado na estrutura. Todavia, o efeito estético foi surpreendente e optou-se por deixá-lo aparente (PASSUELO, 2004).

Figura 11: Edifício Flextronics, Sorocaba, São Paulo.



Fonte: <https://www.sidonioporto.com.br/flextronics>

Todavia, apesar da intencionalidade de arquitetos brasileiros, o país ainda mostra-se relativamente muito tímido na execução de projetos em estrutura de concreto armado utilizando o cimento branco com e sem pigmentos, quando comparado ao Estados Unidos e a Europa. Nos EUA o cimento branco é amplamente utilizado em diversas áreas, como barreiras de concreto para autoestradas até a construção de edifícios, a exemplo do The RSA Tower Office Building (Figura 12), no Alabama, a catedral da Arquidiocese de Los Angeles e o aeroporto de Dulles (KIRCHHEIM, 2003).

Figura 12: The Retirement Systems of Alabama Tower Office Building, Montgomery, EUA.



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RSA_Tower,_Montgomery,_South_view_20160713_1.jpg

Na Europa o material também é muito difundido, presente em projetos assinados por grandes arquitetos como Santiago Calatrava e, o já mencionado, Álvaro Siza. Entre as obras realizadas na Europa utilizando o cimento branco, destaca-se a Igreja *Dives in Misericordia* (Figura 13), do arquiteto Richard Meier, localizada em Roma, na Itália. A edificação utilizou painéis pré-fabricados em concreto branco com princípio ativo fotocatalítico desenvolvido pela empresa Italcementi em parceria com a Universidade de Ferrara. Desta forma, o material possui a capacidade de autolimpeza, diminuindo a necessidade de manutenção e aumentando a sua durabilidade (PASSUELO, 2004; ITALCEMENTI, 2019).

Figura 13: Igreja Dives in Misericordia, Roma, Itália.



Fonte: <https://architalia.com.br/dio-padre-misericorioso/>

A preferência pelo uso de concreto aparente cromático permeia satisfação estética, durabilidade e custo, além de benefícios associados ao seu emprego. Quanto aos custos dos insumos, pode-se aferir que este pode chegar a ser de duas a três vezes maior que o cimento cinza, sobretudo pela necessidade da seleção cuidadosa dos agregados. Outro fator que gera acréscimos no custo do concreto branco é o acabamento final, que prescinde de mão-de-obra especializada e fôrmas especiais, e a aplicação de sistemas de proteção. No entanto, o consumo médio de cimento branco aproxima-se ao do cimento cinza. E no que refere-se ao consumo por MPa, o cimento branco tende a ser mais satisfatório, resultando em maior durabilidade do material, uma vez que a

elevada compacidade do cimento branco diminui a probabilidade de absorção de fluidos (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

A preocupação com o acabamento final e a aplicação de impermeabilizantes, leva a uma vida útil mais prolongada da estrutura, evita retrabalhos e mantem o valor estético do concreto aparente. Ademais, o uso do concreto cromático, elimina a necessidade da aplicação de revestimentos, ao passo que, em sua maioria, estes materiais possuem vida útil inferior e necessidade de manutenção mais frequentes, além de mascarar a aparência natural do concreto. Assim, todos os custos iniciais para garantir uma boa qualidade de acabamento do concreto aparente, resulta em ganhos na qualidade e durabilidade do material e no valor estético (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Apesar das mais variadas possibilidades ofertadas no mercado, a arquitetura Contemporânea, assim como a arquitetura Pós-moderna, valoriza o uso da cor lisa ou com texturas, sem imitar as nuances naturais dos revestimentos (GOMES, 2015). Neste contexto, o uso do concreto cromático passa a valorizar as estruturas, buscando maior vivacidade e alegria das edificações, tirando a monotonia do cinza e acrescentando vida a cidade e/ou edificação. Assim, é crescente a busca por materiais que tenham alto valor estético agregado, mas que também satisfaça as demandas de resistência e durabilidade, além das demandas ambientais, amenizando também os gastos decorrentes de sua produção.

3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO CROMÁTICO

A produção do concreto cromático requer certa rigorosidade, pois a escolha de cada material de produção afeta a cor final do produto. Segundo a PCA (*Portland Cement Association*), a seleção dos agregados, das adições, dos pigmentos e do cimento utilizados no concreto cromático deve obedecer a critérios rigorosos, atentando-se para o tipo, a cor, a dosagem e a graduação de cada elemento constituinte, e durante todo o processo não deve haver nenhuma alteração de qualquer componente, visando manter a superfície homogênea. Ademais, o acabamento superficial dado ao material também influencia na sua coloração, aumentando a vivacidade da cor quanto mais lisa for a superfície.

3.2.1 Cimento Portland branco estrutural

Segundo a NBR 12989-1993, o cimento Portland branco é um aglomerante hidráulico e pode ser subdividido em estrutural e não estrutural, o primeiro é utilizado na produção de concreto estrutural e o último é aplicado na produção de rejuntas, revestimentos e outros usos complementares. A sua aplicação na produção de concreto cromático permite maior intensidade da cor original do pigmento empregado, despertando maior interesse de arquitetos, engenheiros e clientes. É importante ressaltar que cimentos do mesmo tipo e fabricante podem ter a sua tonalidade alterada de acordo com os lotes, desta forma, qualquer mudança deve ser avaliada, buscando evitar diferenças no produto final (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

O cimento Portland branco possui fundamentalmente as mesmas propriedades do cimento cinza, com exceção da cor. Assim como o cimento cinza, um dos principais elementos da sua composição é o clínquer, extraído do calcário, da argila ou de materiais silicosos. Todavia, para conseguir o cimento branco, a matéria-prima utilizada deve possuir porcentagens muito baixas de óxido de ferro, além de elementos como o manganês (Mn), o cromo (Cr) e o titânio (Ti), por isso, geralmente é aplicado o caulim, em conjunto com o giz e o calcário sem a presença de quaisquer impurezas (NEVILLE, 1997 apud. KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Todavia, a diminuição de ferro ocasiona a necessidade de elevação da temperatura acima de 1500 °C, e consequentemente maior gasto energético e aumento do custo final do produto. Uma das alternativas é a aplicação de fluoreto de sódio e alumínio, denominado de criolita (Na_3AlF_6), para atuar como fundente de clínquerização. Ademais, durante este processo não deve ser utilizado o carvão como combustível, evitando a contaminação pelas cinzas, algumas das alternativas são o óleo ou o gás (HAMAD, 1995).

Outra diferença entre o cimento cinza e o cimento branco é a finura do material, já que a brancura do concreto acresce conforme o aumento da superfície específica dos seus componentes. Esta característica também influencia na sua reatividade com a água, divergindo o tempo de início de pega entre os cimentos, para evitar este problema pode-se utilizar o sulfato de cálcio, encontrado na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita natural ou anidrita solúvel (CaSO_4). O início de pega também é influenciado pelo alto teor de silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), a fase mais reativa do clínquer, elevado em decorrência da diminuição do ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Quanto a propriedades mecânicas do concreto branco, pesquisadores como Hamad (1995), Katz (2002), Benitez *et al.* (2003), Kirchheim (2003), Passuelo (2004), Piovesan (2009), entre outros, concluíram em seus estudos que o concreto de cimento branco pode atingir valores de resistência superiores ao concreto de cimento cinza. Benitez *et al.* (2003), por exemplo, ao compararem o cimento branco e o cimento cinza CPV-ARI, averiguaram que a resistência do concreto branco, com ou sem uso de aditivo, é superior ao concreto convencional. O mesmo foi verificado nos estudos de Passuelo (2004), tendo o concreto branco atingido cerca de 70% da resistência final aos 3 dias de idade, mostrando semelhança com concretos de alta resistência inicial.

A avaliação da durabilidade do concreto branco é uma tarefa complexa, considerando o seu uso mais recente e as poucas pesquisas realizadas nesta área. No entanto, pesquisadores como Barin (2008), Andrade e Nobre (2005), Siqueira (2008), Dellinghausen *et al.* (2009), Lubeck (2008), entre outros, realizaram estudos acerca de propriedades como a absorção d'água, a penetração de cloreto, a resistividade elétrica, a profundidade de carbonatação,

a corrosão de armaduras e a retração do concreto, afim de analisar a durabilidade do concreto de cimento Portland branco.

Nos estudos de Barin (2008) e Lubeck (2008), percebeu-se que o refinamento dos poros em decorrência do aumento de adição de escória diminui a absorção capilar do concreto, aumenta a resistividade elétrica e reduz a condutividade da solução aquosa. No entanto, o aumento do teor de escória deve ser acompanhado da adição de um ativador químico, como o sulfato de sódio (Na_2SO_4), evitando a diminuição da resistência à compressão (LUBECK, 2008). Estes resultados, assim como a menor profundidade de carbonatação averiguada no estudo de Katz (2002), apontam o potencial de durabilidade do concreto de cimento branco.

O uso do concreto de cimento branco não restringe-se a edificações, nos Estados Unidos, por exemplo, são produzidas barreiras de concreto para autoestradas intercalando blocos de concreto cinza e branco (Figura 14). A implementação deste bloco pelo Departamento de Rodovias de New Jersey decorre da maior reflexibilidade do concreto branco em relação ao concreto cinza, que pode chegar a ser duas vezes maior. Esta característica melhora a visibilidade e a demarcação da pista, reduzindo o número de acidentes, principalmente à noite (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2002).

Figura 14: Barreiras de concreto branco e cinza.



Fonte: PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2002.

3.2.2 Agregados

Os agregados ocupam grande parte do volume do concreto, por isso a sua natureza e granulometria afetam o comportamento do material, sendo percebida uma relação entre o agregado e a qualidade do concreto, tanto em estado fresco, quanto em seu estado endurecido (KIRCHHEIM *et al.*, 2011). Desta forma, é imprescindível a avaliação da rocha matriz da qual o agregado originou-se, pois influencia nas características petrográficas, densidade de massa, dureza, composição química e mineralógica, estabilidade química e física, resistência e cor (NEVILLE, 1997 apud. PASSUELO, 2004).

Os parâmetros de qualidade para a seleção de agregados são a porosidade, o módulo de elasticidade, a composição granulométrica, a forma, a textura, a absorção de água, a resistência à compressão e, especialmente em concreto cromático, a cor, além da disponibilidade na região e do custo (HARTMAN; BENINI, 2011). Os aspectos de cor destes componentes são fundamentais, principalmente quando trata-se de agregados miúdos, pois é conhecido que as menores partículas constituintes da massa são as que mais influenciam na cor do produto final. No caso dos agregados graúdos, quando livres de material pulverulento, não é comum que ocorra alteração da cor do concreto. Todavia, quando utilizados agregados de cores fortes e desejada homogeneidade da superfície, a camada aparente de argamassa deve ser mais espessa, para que seja conseguida determinada opacidade, sem causar sombreamentos no concreto (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Ao selecionar agregados de cores mais fortes é necessário a aplicação de maior quantidade de argamassa e lavagem do material, estes processos implicam em maior custo do produto final. Neste caso, a escolha de agregados de cores mais claras apresentam vantagens econômicas, além de melhoria dos aspectos estéticos. Os materiais mais comuns são os naturais como o quartzo, o mármore, o seixo, o calcário e o granito, todavia, as cores destes materiais variam conforme a sua distribuição geológica, passando por tons de rosa, vermelho, marrom, cinza, azul, verde, preto e branco translúcido. Entre estes, o mais recomendado são os agregados provenientes de rochas calcárias, pois, quando moído, possui cores brancas e cinzas (HARTMAN; BENINI, 2011).

Além dos agregados naturais, também podem ser utilizados agregados artificiais, como vidro e cerâmicas. O uso destes componentes são uma opção interessante para concreto cromático com agregado exposto, devendo-se atentar também para as formas do material. Nestas aplicações os agregados mais arredondados oferecem maior limpeza em contraponto aos agregados angulares (HARTMAN; BENINI, 2011). As partículas mais angulosas e rugosas também dificultam a trabalhabilidade da massa, devido a difícil movimentação no concreto fresco, exigindo maior quantidade de água e de pasta ou aditivos superplastificantes, elevando os custos de produção do concreto (KIRCHHEIM *et al.*, 2011; PASSUELO, 2004).

3.2.3 Aditivos

O processo de produção de concreto, cromático ou cinza, envolve o acréscimo de aditivos, pois são capazes de melhorar física e economicamente o produto final. No caso do concreto branco, a menor trabalhabilidade do material requer aumento da relação água/cimento, podendo prejudicar as características mecânicas do material, então, para manter a trabalhabilidade, torna-se essencial o uso de aditivos em porcentagem maiores que o aplicado em concreto de cimento cinza (FONSECA; NUNES, 1995).

Os aditivos possuem diversas composições químicas, atuando de formas diferentes e desempenhando mais de uma função, tornando difícil a sua classificação. No Brasil, a NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland, estabelece a sua classificação em aditivo plastificante, retardador, acelerador, plastificante acelerador, plastificante retardador, superplastificantes, superplastificantes retardador, superplastificantes acelerador e incorporador de ar.

Em decorrência da baixa trabalhabilidade do concreto branco, o aditivo mais indicado para a sua produção são os superplastificantes. No entanto, a escolha do tipo e da dosagem de superplastificantes, ou outro aditivo escolhido, deve ser realizada de forma cuidadosa, para que não afetem negativamente a cor do produto final. Os mais recomendados são os aditivos a base de carboxilatos, melamínicos ou policarboxilatos, que são líquidos de cor clara e reduzem cerca

de 40% da água aplicada. Enquanto que os aditivos a base de naftaleno sulfonado são mais escuros e diminuem apenas 12-30% da água no concreto (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

3.2.4 Pigmentos

O uso de pigmentos na composição do concreto permite uma flexibilidade formal com diversas soluções no que tange a sua expressão estética, ressaltando formas e volumes e conferindo maior vivacidade aos tons pálidos herdados do período moderno. E, diferentemente das tintas e outros revestimentos, permite trabalhar a cor em profundidade, sem mascarar a textura natural do concreto.

A tecnologia de fabricação, bem como a diversidade de cores e os tipos de pigmentos, foram alteradas inúmeras vezes desde a origem do primeiro pigmento, produzido artesanalmente pelo homem, até a contemporaneidade. Atualmente são oferecidos pigmentos orgânicos, à base de água, e inorgânicos, à base de óxidos (AGUIAR, 2006). O refinamento dos processos de produção dos pigmentos, especialmente no que refere-se aos inorgânicos, busca produzir partículas menores e com elevada pureza de cor, com o intuito de aprimorar o brilho e a capacidade de pigmentação (COELHO, 2001).

Os pigmentos orgânicos são materiais não poluentes obtidos através de sínteses químicas, provenientes do carvão e do petróleo. A sua vasta utilização decorre da obtenção de variados os níveis de resistência solicitados pelo material a ser aplicado, bem como das mais diversas tonalidades. Podem ser empregados em diferentes produtos industriais, incluindo tintas e vernizes aplicados na construção civil e na indústria automotiva (AGUIAR, 2006). Não são aplicados em concreto com frequência, devido a possibilidade de eflorescência do produto.

Os pigmentos inorgânicos são materiais provenientes de óxidos de ferro, de cromo e de cobalto. Estes são os mais recomendados para a produção de concreto cromático, pois são inertes com os demais constituintes do concreto, têm pH estável, são insolúveis em água, misturam-se com facilidade ao cimento

e aos finos do concreto, mantem sua cor original e possuem boa resistência à ação das intempéries e da luz (COELHO, 2001).

Tabela 1 - 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	Alta	Baixa
Força colorística	Baixa	Alta
Migração/eflorescência	Não ocorre	Possível

Fonte: Rojas, 2001 apud. Piovesan 2009.

Os óxidos de ferro são obtidos, principalmente, de sucata de ferro velho. As linhas mais utilizadas são sintéticas e apresentam grande variedade de cores, em decorrência dos diferentes processos de oxidação. A primeira origina o amarelo, variando para o vermelho a partir de uma determinada mudança de temperatura, e o preto é obtido com a remoção do oxigênio do processo. As demais cores, como ocre, terra, areia, laranja, entre outras, são obtidas a partir da combinação destas cores. Os pigmentos de óxido de ferro são utilizados em telhas, rejuntas, blocos, pisos, argamassa, fachadas pré-fabricadas e peças estruturais de concreto (AGUIAR, 2006).

Os pigmentos nas cores verde e azul não são muito utilizados no Brasil devido ao custo mais elevado, pois provém de óxido de cromo e cobalto, respectivamente. Ademais, estas cores quando provenientes de pigmentos orgânicos, possuem baixa durabilidade em áreas externas (AGUIAR, 2006). Para a manutenção da cor e da resistência à abrasão de concreto branco com adição de óxido de cromo, faz-se necessária a adição de fíler calcário (COLAK, 2008).

Os pigmentos podem ser encontrados em pó, forma mais comum, em granulados ou em dispersões. Os granulados possuem excelente fluidez, proporcionando melhor utilização em sistemas automáticos de dosagem, e não geram poeira, assim como as dispersões (HARTMANN; BENINI, 2011). No entanto, as formas mais utilizadas são o pó e a dispersão.

Os pigmentos em dispersão, também conhecidos como pasta ou *slurries*, não produzem material particulado durante as operações, apresentando menor risco ambiental e maior produtividade (HARTMANN; BENINI, 2011). As suas principais vantagens são a maior uniformidade na cor, a facilidade de medição e manuseio. Contudo, a presença de alto percentual de água dificulta o seu transporte, elevando o custo, e possibilitando a deposição do pigmento no fundo quando não é agitado por um tempo prolongado (REVISTA PISOS INDUSTRIAIS, 2006, apud. CONCEIÇÃO, 2015).

A aplicação de pigmentos não deve comprometer a resistência, a durabilidade e a trabalhabilidade do concreto. Nesta linha, Piovesan (2009), verificou em seu estudo que a adição de pigmentos proporcionou um pequeno aumento na resistência à compressão, além de não influenciar na absorção de água ou na profundidade de carbonatação, ou seja, não afeta a durabilidade do material. Todavia, a análise realizada por Aguiar (2006), mostrou que a partir de 3% de adição de pigmento a resistência do concreto diminui em 14%, e em adições com percentuais maiores faz-se necessário o uso de aditivo superplastificantes em elevada quantidade, devido à perda de trabalhabilidade do concreto.

A diferença entre estes estudos pode estar no processo de produção e execução das amostras. Segundo Hartmann e Benini (2011) a produção do concreto cromático exige uma série de cuidados especiais, como a seleção adequada de matérias-primas, dosagem constante e mistura homogênea do concreto, condições adequadas de cura, armazenamento e forma de dosagem do pigmento.

Os pigmentos devem ser empregados em teores de 3% a 5% para produção de concreto cromático, não devendo ultrapassar a faixa de 10%, segundo a ASTM C979:2010 (HARTMANN; BENINI, 2011). A aplicação de valores menores produz concretos em tons pastéis com um grande leque de cores. No entanto, a aplicação de valores superiores não promove aumento de tonalidade, chegando a um ponto de saturação de cor, além de aumentar a quantidade de finos presente na mistura. Desta forma, deve-se optar preferencialmente pelo uso de pigmentos com alto poder de pigmentação (COELHO, 2001).

3.2.5 Adições minerais

O uso de adições minerais em concreto já é bastante consolidado no Brasil e no exterior. Estes materiais podem melhorar as características químicas e físicas do concreto cinza ou cromático. As adições atuam de forma a elevar a resistência à fissuração e resistência final, melhorar a trabalhabilidade, aumentar a impermeabilidade por meio do refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição e melhoraram a durabilidade do concreto (PASSUELO, 2004; CONCEIÇÃO, 2015).

Além dos benefícios de engenharia, como a melhor trabalhabilidade, as adições também podem trazer benefícios ecológicos e econômicos, uma vez que reduzem o custo do aglomerante por meio da utilização de resíduos ou subprodutos industriais, muita das vezes tóxicos ao homem e ao meio ambiente. Ao mesmo tempo que diminuem a emissão de CO₂ e outros poluentes, em decorrência da menor produção de cimento (MALHOTRA; MEHTA, 1996 apud. GEYER, 2001).

Os tipos de adições que podem ser incorporadas ao concreto são muito variados, podendo ser divididas em quimicamente ativas (pozolanas e cimentantes) e quimicamente inativas (fíleres). Entre os mais utilizados estão os fíleres, a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa e a argila calcinada. Contudo, quando trata-se de concreto branco, a escolha da adição deve ser cuidadosa, principalmente no que tange a cor do material, uma vez que a porção mais fina presente na pasta possui grande influência na tonalidade final do concreto (FONSECA; NUNES, 1995).

Segundo a ABNT NBR 12653-2014, argila calcinada é um material derivado da calcinação de argilas, reação ocorrida em temperaturas de 500°C a 900°C, garantindo reatividade com o hidróxido de cálcio. Este processo provoca um fenômeno denominado de desidroxilação originando um novo material chamado de metacaulinita (Al₂Si₂O₇), com excelente atividade pozolânica (TIRONI *et al.*, 2014). As argilas, por sua vez, são argilominerais provenientes do intemperismo de silicatos minerais encontrados nas rochas (ANTONI, 2013). Estes materiais podem ser divididos em caulinitas, ilitas e esmectitas (montmorilonita), entre outras formas menos comuns (FERNANDEZ LOPEZ, 2009). Para o uso como

pozolanas, as argilas cauliníticas são as mais empregadas, pois são altamente reativas e requerem temperatura menor que as argilas ilitas e esmectitas (FERNANDEZ LOPEZ, 2009; GARCIA *et al.*, 2015; LINS, 2017).

Para o uso em concreto cromático o metacaulim mais apropriado deve ser proveniente dos rejeitos da indústria do papel, pois este material apresenta tonalidade mais clara do que as argilas cauliníticas puras. Ademais, o seu uso mantém a excelente atividade pozolânica do metacaulim e apresenta vantagens ecológicas, uma vez que estes resíduos não recebem destinação adequada (SOUZA, 2003).

A introdução de argila calcinada já é estudada há anos por diversos pesquisadores, comprovando as melhorias nas características físicas do concreto. Kuliffayová *et al.* (2012) estudaram os efeitos da substituição do cimento por argila calcinada, neste estudo foi possível observar que, aos 28 dias, todas as misturas, com diferentes teores de substituição (5%, 10% e 15%), obtiveram resultados superiores ao concreto de referência, elevando a resistência a compressão com o aumento da porcentagem de substituição.

Os fíleres são materiais obtidos por meio da moagem de materiais como o calcário, basalto, entre outros, possuem granulometria similar ao cimento Portland e, geralmente, são considerados inertes. No entanto, a sua finura permite o preenchimento de vazios do concreto, melhorando a sua trabalhabilidade, densidade, permeabilidade e capilaridade (NEVILLE, 1997 apud. PASSUELO, 2004).

Um dos fíleres mais usados são provenientes de rochas calcíticas, denominados fíler calcário. E, apesar de considerado um material inerte, a sua elevada finura pode melhorar a hidratação do cimento, principalmente nas primeiras idades (CYR *et al.* 2005; HOPPE FILHO, 2008). Entretanto, quando realizadas substituições que excedem os percentuais de 10% a 15%, são percebidos efeitos negativos na resistência e na durabilidade do concreto (LOTTHENBACH *et al.*, 2008). Desta forma, estão sendo realizadas pesquisas que buscam aumentar o teor de adição de fíler calcário. A composição que mais permite este aumento é a mistura ternária denominada de LC³, composta por argila calcinada, fíler calcário e cimento, que vem possibilitando o aumento do

uso das adições minerais, gerando impactos econômicos e ecológicos na produção do cimento.

3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO CROMÁTICO

3.3.1 Considerações iniciais

Segundo Aguiar (2006), o concreto cromático pode ser produzido de três maneiras distintas. A primeira consiste na pintura da superfície do concreto endurecido, a segunda na adição de pigmentos na mistura da pasta de concreto e, por último, o alcance de uma tonalidade derivada da seleção de agregados graúdos e miúdos com as cores pretendidas e efeito mais natural dos componentes. A primeira opção é a menos atraente, pois a pintura altera a textura natural do concreto, além de possuir vida útil inferior, necessitando de manutenção mais frequente (PASSUELO, 2004).

A adição de pigmentos na pasta de concreto oferece uma ampla gama de cores que podem ser produzidas, diferenciando-se por meio dos teores e da mistura de pigmentos, da seleção dos agregados graúdos e miúdos, das formas aplicadas e do cimento escolhido. O uso de cimento cinza, por oferecer tonalidade mais escura, produz concreto cromático com menor intensidade dos pigmentos. No entanto, com o surgimento do cimento branco, obtém-se a reprodução mais fiel das cores originais do pigmento aplicado.

Além do cimento branco e cinza, outras opções para a produção do concreto cromático vem sendo exploradas. A exemplo do cimento LC³, produzido com matérias-primas de tonalidades mais claras do que as do cimento convencional, principalmente quando advindas do Estado do Pará, apresenta uma cor de cinza menos intensa e mais próximo ao branco. A utilização do LC³ pode gerar benefícios tanto na cor do produto final, quanto nos custos de produção do concreto cromático e em impactos ambientais.

3.3.2 Etapas de produção

A produção do concreto cromático envolve a seleção rigorosa dos componentes, bem como o controle da quantidade aplicada, visando manter homogeneidade colorimétrica da superfície aparente, além de garantir a resistência e a durabilidade do material. Desta forma, o processo de pigmentação estabelecido em laboratório deve ser obedecido em todo o processo de concretagem (CONCEIÇÃO, 2015). Para a correta dosagem de cada componente, Hartmann e Benini (2011) indicam o uso de equipamentos gravimétricos ou recipientes volumétricos indeformáveis, e ressaltam que as variações não devem ultrapassar o valor de 3%.

De acordo com Conceição (2015), a mistura do pigmento varia de acordo com a sua apresentação. No caso de pigmentos líquidos, a solução aquosa pode ser adicionada na pasta de amassamento do concreto, após a mistura dos agregados e do cimento à 50% da água que deve ser utilizada. Desta forma, garante-se que os agregados não irão incorporar o pigmento por efeito hidrostático. Os pigmentos em pó devem ser pré-misturados a seco com o agregado graúdo, estes irão ajudar a romper os aglomerados do pigmento. Após a adição do cimento deve ser realizada uma mistura complementar e por último a mistura a úmido após a adição da água (HARTMANN; BENINI, 2011).

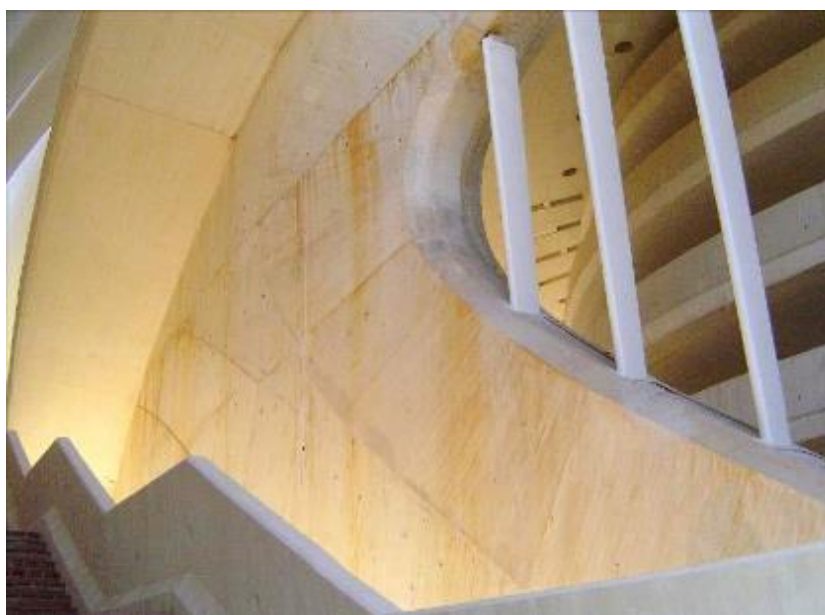
A adição do pigmento no concreto eleva a demanda de água na mistura, mas o excesso da relação água/cimento implica diretamente na cor, resistência e durabilidade do produto. Para evitar estes problemas é recomendado o uso de aditivos superplastificantes, aumentando também a trabalhabilidade do concreto (HARTMANN; BENINI, 2011). Segundo Passuelo (2004), os aditivos devem ser adicionados logo após o cimento, fazendo com que alcance a sua máxima eficiência.

Durante a execução das fases de lançamento e vibração do concreto também devem ser adotados certos cuidados, evitando que ocorra ascensão de nata, formação de bolhas de ar e poros superficiais, assim, antes do lançamento, deve-se assegurar que o concreto seja coeso. Também podem ser adotados funis de lançamento, para que não ocorra aderência de nata nas laterais das formas e consequente formação de manchas na superfície. Quanto a vibração

deve ser realizada de forma homogênea com o vibrador inserido verticalmente e entre camadas, penetrando 150 mm na camada anterior, evitando o excesso de vibração e a formação de manchas superficiais (KIRCHHEIM *et al.*, 2011; HARTMANN; BENINI, 2011).

Outro cuidado de extrema importância diz respeito a proteção das armaduras, prevenindo o surgimento de manchas por oxidação e/ou corrosão (Figura 15) e por sujeiras encrostadas, ocasionadas pelo incorreto armazenamento do aço no canteiro de obras. As barras devem ser protegidas com pinturas à base de zinco, epóxi ou galvanizadas (KIRCHHEIM *et al.*, 2011). Ademias, para o correto cobrimento destas armaduras, devem ser utilizados espaçadores, os quais devem, preferencialmente, ser de material semelhante ao concreto. Também não devem ser executadas camadas com espessuras maiores que 50 cm, impedindo a formação de bolhas de ar nas laterais das fôrmas (FONSECA; NUNES, 1998).

Figura 15: Mancha por oxidação em concreto branco.



Fonte: KIRCHHEIM *et al.*, 2011.

A aparência superficial do concreto cromático também depende das fôrmas, as quais devem ser inspecionadas antes da concretagem, evitando o vazamento de nata, marcas indesejadas, zonas com falhas de concretagem e porosidade e garantindo boa durabilidade do concreto. Outra característica possibilitada pelas fôrmas são as texturas, que partem da escolha do material utilizado na obra

(KIRCHHEIM *et al.*, 2011). Alguns dos materiais mais indicados são as fôrmas de madeira e aço, os quais são consideradas mais econômicas e de melhor desempenho estrutural. Mas as fôrmas de papel, borracha, papelão acartonado, plástico e outros materiais são amplamente utilizados, principalmente quando almeja-se diferentes formas e texturas do concreto (HARTMANN; BENINI, 2011).

As fôrmas podem ser retiradas de 12 a 24 horas após a concretagem, evitando a exposição prolongada ao calor de hidratação, deformações e manchas na sua superfície (HARTMANN; BENINI, 2011). Para a maior eficiência do processo de desforma, são indicadas as aplicações de desmoldantes, escolhidos com base no material da fôrma aplicada. Devem ser evitados os desmoldantes a base de óleos, os mais recomendados são à base de parafina incolor ou água (FONSECA; NUNES, 1998).

Entretanto, segundo Kirchheim *et al.* (2011), a desforma nas primeiras idades prescinde também de um processo de cura cuidadoso, evitando retração e fissuração do concreto. Este processo deve ser realizado, preferencialmente, com água, evitando a rápida evaporação ou a condensação e consequente aparecimento de manchas e patologias, como a eflorescência (CARVALHO; CALAVERA, 2002).

3.3.3 Proteção superficial

Além dos cuidados com a seleção dos materiais e execução do concreto cromático, devem ser estabelecidos métodos de proteção da estrutura após a sua finalização ou incluso no próprio processo de produção do cimento ou do concreto. Para a correta escolha do sistema adotado devem ser levadas em consideração a compatibilidade com as propriedades químicas do concreto, a exposição solar e, principalmente, a influência na tonalidade do concreto.

A utilização dos sistemas de proteção tornam-se necessárias uma vez que o concreto apresenta, naturalmente, características de porosidade e rugosidade, facilitando o acúmulo de poluentes presentes na atmosfera e absorção de água, diminuindo a vida útil da estrutura. Desta forma, os sistemas de proteção

garantem uma boa estética do concreto por muito mais tempo, durabilidade da estrutura e manutenção da superfície. Os tipos de sistemas de proteção são bastante variados e atuam de maneiras distintas. Entre eles destacam-se os hidrofugantes, os impermeabilizantes e os sistemas de hidratação secundária (PASSUELO *et al.*, 2006).

Segundo o estudo de Passuelo *et al.* (2006), os sistemas de melhor desempenho são os hidrofugantes à base de siloxanos ou silanos, pois estes reduziram em 60% a absorção de água e não modificaram a cor do concreto. Desta forma, auxiliam na manutenção estética do concreto e na durabilidade da estrutura. Já o sistema à base de silicatos, apesar de não alterarem a cor do concreto, reduziram apenas em 27% a absorção de água, em comparação aos 43% do impermeabilizante. Contudo, já é comprovado que os impermeabilizantes provocam amarelamento do concreto, devido a sua sensibilidade aos raios ultravioletas da luz solar (PASSUELO, 2004).

Além dos sistemas de proteção, outros métodos vem sendo desenvolvidos para auxiliar na manutenção das estruturas de concreto. Estes sistemas são capazes de autoeliminar alguns tipos de gases poluentes da sua superfície empregando a fotocatalise. Este processo, na presença da luz solar, facilita a oxidação dos poluentes que são posteriormente lavados pela água da chuva. Desta forma, o concreto empregado contribui para uma melhor qualidade do ar e diminuem os custos e frequência de manutenção das estruturas. Algumas construções como o Centro de Artes Dramáticas e o Residencial The Commodore já utilizaram a tecnologia em suas construções (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

3.3.4 Custos

Os concretos cromáticos podem ser produzidos com cimento cinza ou cimento branco. Contudo, o cimento cinza, em decorrência da sua tonalidade mais escura, torna impossível a produção de concreto cromático de cores vivas, apesar da comercialização de um cimento cinza mais claro no Estado de São Paulo (SOLUÇÕES, 2018). Com isso, a preferência pela produção de concreto cromático a partir de cimento branco é crescente. Todavia, no Brasil não é

fabricado cimento branco, sendo que todo produto comercializado no território nacional provém da exportação do material de países como a Dinamarca (Alborg) e o México (Tolteca), tornando o cimento branco 3 vezes mais caro do que o cimento cinza e elevando os custos de produção do concreto cromático (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

O alto custo do concreto cromático também está relacionado às diversas exigências para a sua produção, a adição de pigmentos, a maior quantidade de aditivos, o controle de cor, resistência e durabilidade e os sistemas de proteção (PIOVESAN, 2009; PASSUELO, 2004; KIRCHHEIM *et al.*, 2011). Alguns sistemas especiais como os fotocatalisadores podem aumentar o custo do cimento branco em até 12 vezes em relação ao cimento cinza (CONCEIÇÃO, 2015).

Mawakdiye (1998, apud CONCEIÇÃO, 2015) aponta que uma das opções para diminuir o custo de produção do concreto cromático na época era a produção de painéis de espessura mínima encaixados à estrutura de concreto, desta forma a quantidade de pigmento adicionada era reduzida. Atualmente, também são produzidas placas com a mesma finalidade, com diversas cores, texturas, formas e preços (Figura 16).

Figura 16: (a) Placa de concreto; (b) Ripas de concreto; (c) Amostras de placas de granilite.



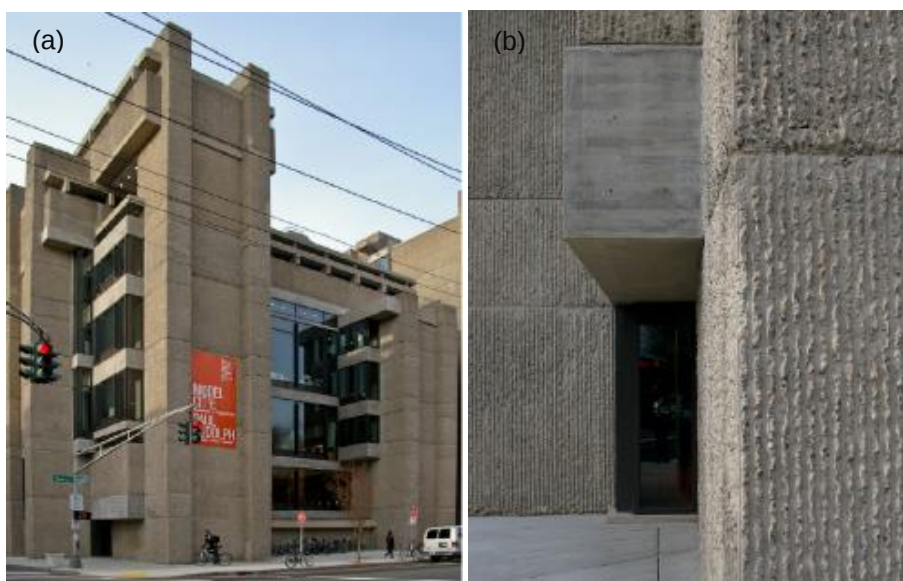
Fonte: <https://tresuno.com.br/concreto/granilites/>

Outra opção que vem sendo analisada é a substituição de cimento Portland branco estrutural pelo cimento LC³ na produção do concreto cromático. Os custos de produção e investimentos são mais reduzidos, uma vez que a calcinação da argila pode ser realizada em equipamentos semelhantes aos de produção do cimento Portland, a temperatura de calcinação (700-900°C) é inferior ao de produção do clínquer (1450°C), a elevada percentagem de substituição do clínquer e a incorporação de calcário (SCRIVENER, 2017; JOSEPH; BISHNOI, 2015). Ademais, a similaridade dos materiais do LC³ com outros cimentos contendo adições minerais possibilita maior aceitação do produto, que também garante resultados positivos de resistência e durabilidade (LINS, 2017) e maior alvura do cimento em decorrência da origem da matéria-prima utilizada.

3.4 CORES, FORMAS E TEXTURAS DO CONCRETO CROMÁTICO

O uso do concreto aparente vem sendo explorado desde o século XIX, buscando conferir ao material uma certa singularidade. Na época do seu surgimento a heterogeneidade da sua superfície desagradava muitos arquitetos, os quais, com o intuito de disfarçar as suas imperfeições, recorriam ao uso de revestimentos ou técnicas de cofragem e se desprendiam da pureza formal do concreto aparente. A dicotomia entre pré-fabricado ou *in situ*, artesanal ou industrial, liso ou rugoso predominava e caracterizava a produção da época. Le Corbusier, por exemplo, optava pela imprevisibilidade da cofragem, enquanto o arquiteto norte-americano Paul Rudolph explorava processos manuais, como a textura obtida no edifício *Art and Architecture Building* (Figura 17), para a Universidade de Yale (GOMES, 2015).

Figura 17: (a) Edifício Art and Architecture Building, Universidade de Yale, Connecticut, Estados Unidos. (b) Detalhe da textura aplicada a fachada do edifício.

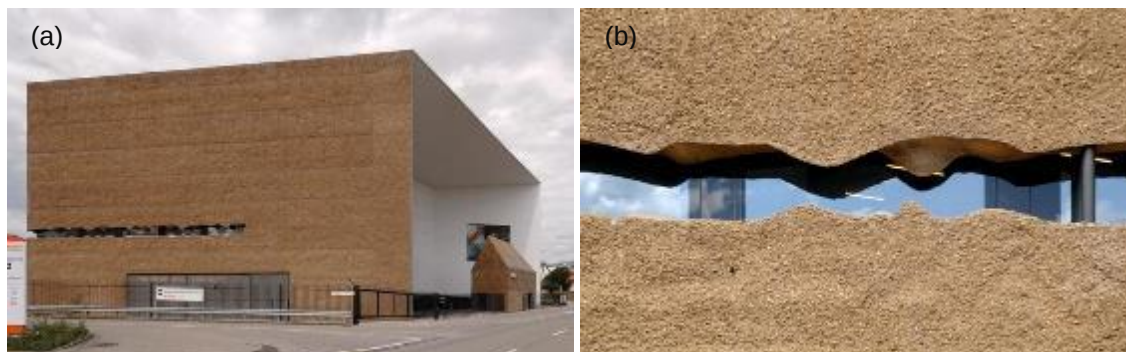


Fonte: GOMES, 2015.

Já no século XX, no fim da década de 80, o entendimento acerca dos efeitos do excesso de água na massa de concreto possibilitou a sua produção com aparência superficial muito mais homogênea. Esta descoberta favoreceu o uso do concreto aparente, emergindo uma arquitetura contemporânea com múltiplos potenciais de exploração do produto. Um dos maiores exemplos desta nova era é o edifício *Schaulager* (Figura 18), projetado pelo escritório Herzog & De

Meuron, de longe apresenta uma massa homogênea que se confunde com a paisagem e de perto revela a heterogeneidade do material (GOMES, 2015).

Figura 18: (a) Edifício do Museu Schaulager, Newmünchenstein, Suíça, 2003. (b) Detalhe da textura aplicada a fachada do edifício.



Fonte: GOMES, 2015.

Do final do século XIX aos dias atuais, as tecnologias que possibilitam os diversos usos do concreto aparente foram modernizadas. Atualmente o concreto pode ser combinado a diversos tipos de materiais que influenciarão a sua estética final, inclusive a pigmentos que conferem maior vivacidade do material. Hartmann e Benini (2011) citam alguns exemplos da aplicabilidade do concreto. O concreto com agregado exposto (Figura 19) são materiais rugosos de elevada durabilidade, podem ser aplicados tanto em superfícies verticais quanto horizontais. São produzidos com adição de agregado na massa de concreto (técnica monolítica), adição dos agregados ao concreto fresco (semeado ou aspergido) ou através de tratamentos com desativadores químicos. A aparência do concreto com agregado exposto é bastante variável, sendo determinada pela profundidade de exposição do agregado, das características de cor, tamanho e forma do agregado, a técnica escolhida e a adição ou não de pigmentos.

Figura 19: Amostras de concreto com agregado exposto.



Fonte: <https://tresuno.com.br/concreto/personalizacao/>

O concreto fotogravado (Figura 20) é outra técnica inovadora na arquitetura, consiste na reprodução de fotografias, gravuras e desenhos na superfície do concreto, por meio do retardamento seletivo da matriz cimentícia. Para a produção do concreto fotogravado é recomendado o uso de concreto autoadensável, pois este diminui a possibilidade de indefinição da imagem. Apesar da sua aparência excepcional o concreto fotogravado ainda não é muito difundido, ao contrário deste o concreto estampado tornou-se bastante popular, principalmente, em residências norte-americanas. O concreto estampado (Figura 21) possibilita a produção de diversas texturas, imitando materiais naturais como a madeira até formas geométricas coloridas.

Figura 20: Concreto fotogravado na fachada do edifício da Université Paul Sabatier em Toulouse, França.



Fonte: <https://www.reckli.com/en/products/photo-concrete/photo-engraving/>

Figura 21: Concreto estampado em textura de ripas de madeira.



Fonte: <https://www.pinterest.com.mx/pin/134404370115853963/>

O concreto cromático também pode ser encontrado em formas e dimensões diferentes, sendo comumente utilizado para a fabricação de blocos intertravados (Figura 22), Outro uso são as telhas em concreto colorido (Figura 23), uma opção econômica e eficaz, uma vez que apresentam maior resistência e dimensões do que as telhas cerâmicas (CONCEIÇÃO, 2015).

Figura 22: Piso intertravado de concreto colorido.



Fonte: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/confira-5-boas-praticas-para-obras-com-pisos-de-concreto-colorido_18786_10_15

Figura 23: Telhas de concreto colorido.



Fonte: <https://cimentomaua.com.br/blog/telhas-de-concreto-conheca-suas-vantagens-e-desvantagens/>

No que diz respeito a cromaticidade do concreto são diversas as possibilidades de cores, diferenciando o cimento (cinza ou branco), os agregados e os pigmentos. Neste âmbito, a mistura de pigmentos mostra-se como uma possibilidade de ampliação da paleta de cores, estas misturas são muito produzidas em laboratórios com o objetivo de alcançar uma cor específica para determinado projeto. Esta possibilidade torna ainda mais única uma construção em concreto cromático e agrega ainda mais valor estético.

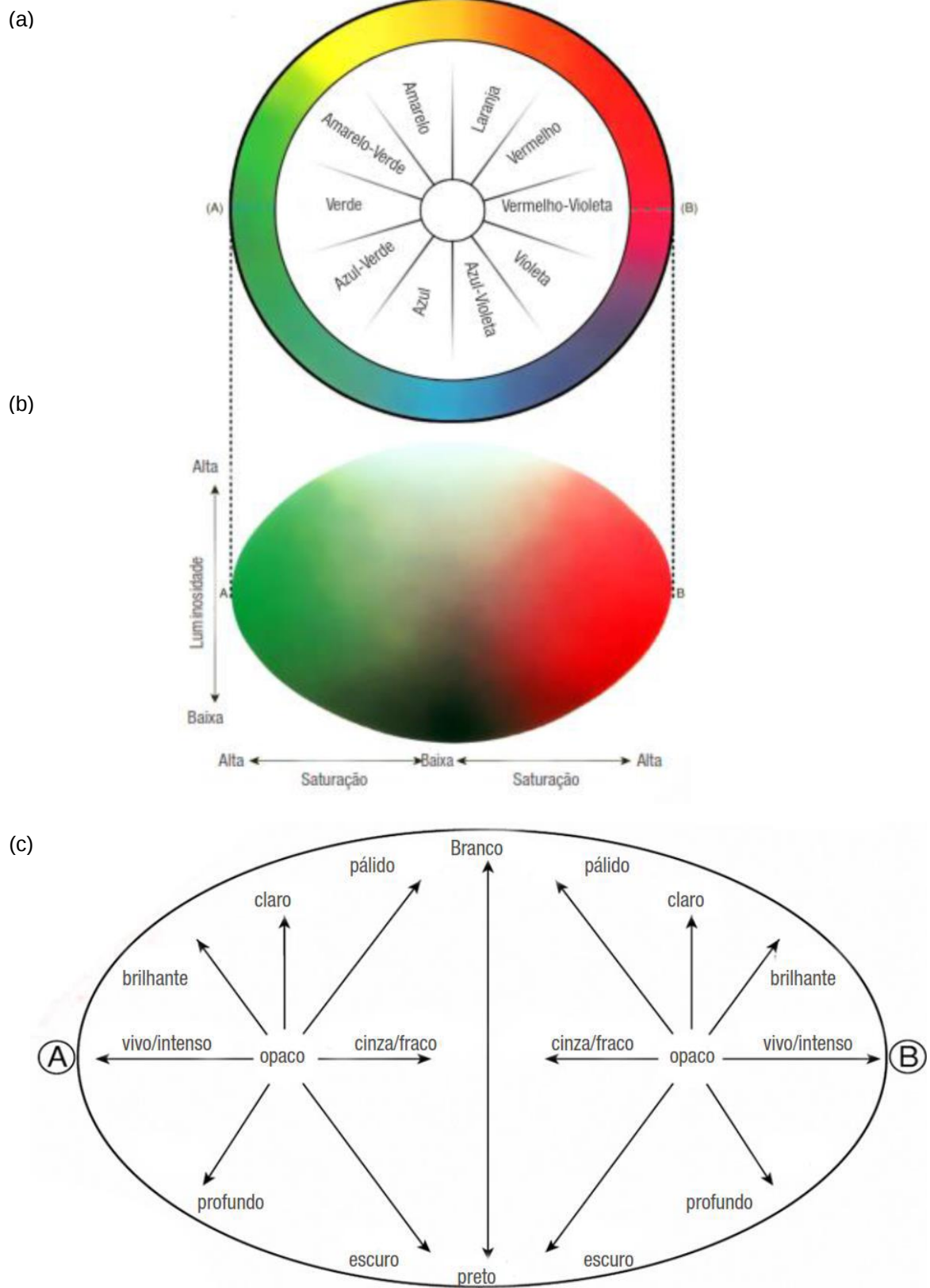
3.5 COLORIMETRIA

A aplicação de cor em materiais de revestimentos surge como um rompimento ao *material truth* da Arquitetura Moderna defendida principalmente por Ruskin e Mies van der Rohe, na qual os materiais devem ser empregados em suas cores e acabamentos genuínos, prevalecendo o uso do concreto, do aço e do vidro. Na Arquitetura Contemporânea a aplicação de cor em materiais de alta tecnologia passa a ser amplamente explorada, aplicando-a em diferentes tons e texturas (BALIEIRO, 2015). Um dos exemplos é o concreto cromático, que possibilita um vasto leque de opções.

A adição de pigmentos no concreto prescinde de avaliações acerca de suas influências no desempenho mecânico do material, mas de nada vale o seu uso se a cor conseguida no produto final não for a planejada no projeto inicial. Desta forma, para tornar o uso do concreto cromático mais eficiente, devem ser realizadas em paralelo análises do seu desempenho mecânico e de colorimetria. Segundo César (2010), conhecer as características da cor permite elaborar uma paleta de cores adequada a cada projeto e sua posterior especificação. No entanto, cabe salientar que a luz, o observador, o objeto e sua disposição no espaço irão moldar a percepção visual da cor, este fenômeno é denominado de metamerismo (PASSUELO, 2004; BALIEIRO, 2015).

Na tentativa de classificar a cor de uma forma mais eficiente, foram desenvolvidos alguns métodos para expressar a cor por meio de modelos matemáticos, considerando sempre as mesmas condicionantes. Estes fundamentam suas relações cromáticas nos três atributos da cor: matiz/tonalidade, luminosidade/refletância e saturação. A matiz refere-se a identificação das cores, como azul, amarelo, verde, vermelho, entre outras. A luminosidade permite classificar as cores em claras ou escuras, ou seja, quanto mais próximas do branco ficam mais claras e quanto mais próximas do preto ficam mais escuras. A saturação indica o nível de pureza da cor, isto é, quanto mais distante do centro da Roda das Cores (Figura 24), mais saturada e pura será a cor (KONICA MINOLTA, 20-?).

Figura 24: (a) Roda das cores; (b) Mudanças em luminosidade e saturação, do vermelho-violeta ao verde; (c) Adjetivos relacionados às cores para luminosidade e saturação.



Fonte: KONICA MINOLTA, 20-?.

O primeiro método foi definido em 1905 por Albert Henty Munsell, conhecido como Sistema de Notação Munsell. Este método é baseado na comparação visual, sendo determinado por sua tonalidade (H), luminosidade (V) e saturação (C). Posteriormente, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE – *Comission Internationale de L'Eclairage*) desenvolveu o sistema Yxy (1931), baseado nos valores tristímulus XYZ, e o sistema L*a*b* (1976), conhecido como CIELAB (BALIEIRO, 2015).

O espaço de cores L*a*b* é um dos mais utilizados atualmente. Foi desenvolvido pela CIE com o intuito de amenizar os problemas do espaço de cor Yxy, uma vez que este não representava as diferenças visuais das cores (ΔE). No sistema CIELAB, o L* indica a luminosidade, enquanto a* e b* são as coordenadas cromáticas. A coordenada a* quando em valor positivo (+a*) direcionasse ao vermelho e quando em valor negativo (-a*) direcionasse ao verde. Já a coordenada b* quando simbolizada em +b* direcionasse ao amarelo e quando em -b* direcionasse ao azul. O sistema é representado graficamente por uma esfera sólida (Figura 25), sendo o seu centro acromático (KONICA MINOLTA, 20-?).

Para calcular os parâmetros do sistema CIELAB são utilizados os valores tristímulus XYZ e as coordenadas do branco padrão sob um determinado iluminante, X_n , Y_n e Z_n , como representado nas equações 1, 2 e 3. A diferença de cor (ΔE) é obtida por meio da expressão 4, na qual ΔL^* é a diferença entre o parâmetro L* em dois pontos, Δa^* a variação do parâmetro a* e Δb^* a variação do parâmetro b* (PASSUELO, 2004).

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (\text{Equação 1})$$

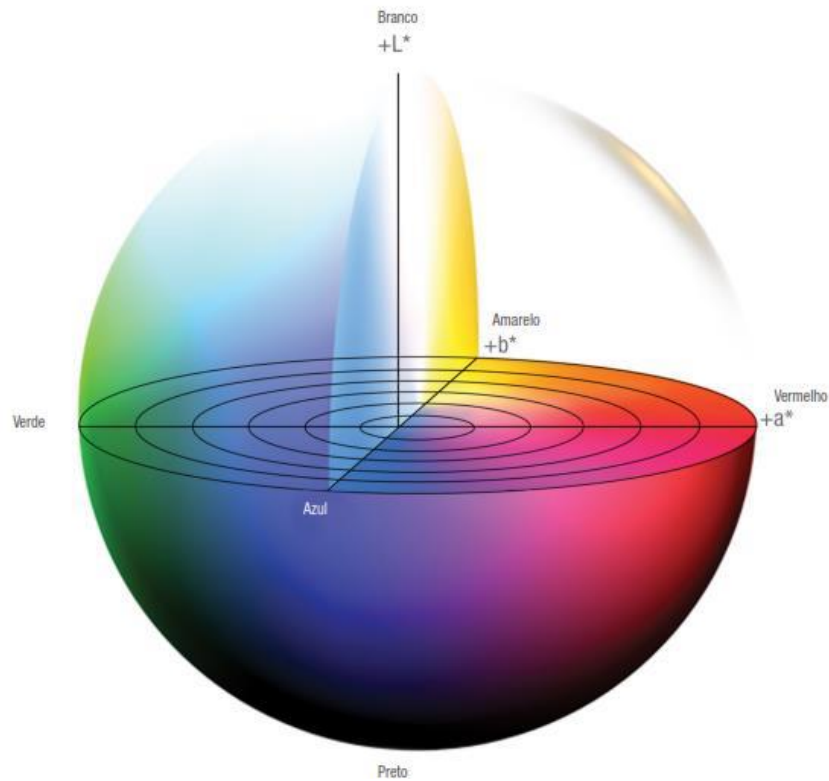
$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

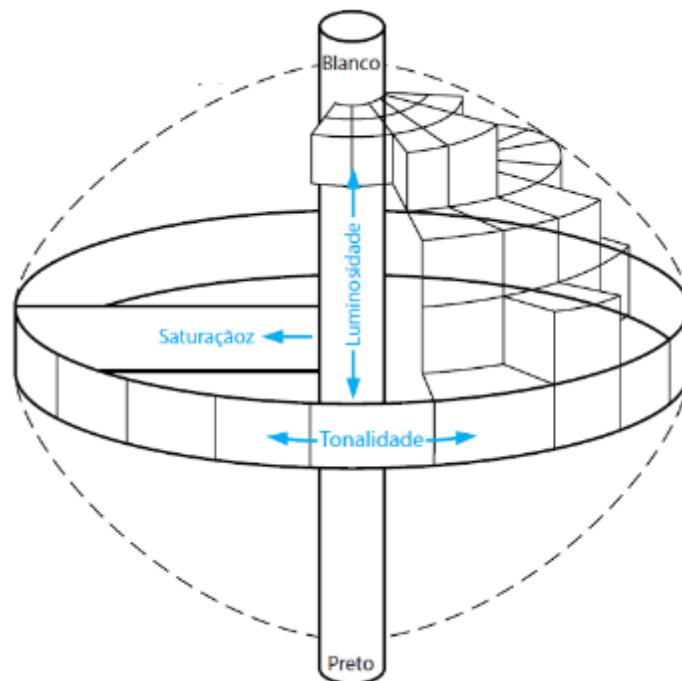
$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (\text{Equação 4})$$

Figura 25: (a) Representação de um sólido de cor no Espaço de Cor $L^*a^*b^*$; (b) Mudanças em luminosidade e saturação, do vermelho-violeta ao verde.

(a)



(b)



Fonte: KONICA MINOLTA, 20-?.

3.6 EFLORESCÊNCIA

A eflorescência é uma patologia muito recorrente na construção civil, causada pela presença de água, sais solúveis, pressão hidrostática e possibilidade de evaporação ou condensação (FERNANDES, 2010). O fenômeno provoca o aparecimento de manchas brancas na superfície do material, sendo mais perceptível em concretos coloridos devido o contraste entre os sais e o substrato, mas pode incidir em qualquer sistema de cimento Portland.

No caso dos concretos, a água dissolve o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 – que migra até a superfície de concreto, neste momento o dióxido de carbono – CO_2 – presente na atmosfera é combinado com o hidróxido de cálcio, produzindo o carbonato de cálcio – CaCO_3 – que se cristaliza formando as manchas esbranquiçadas (NAVISK, 2006).

Figura 26: Eflorescência em blocos de concreto colorido.



Fonte: <http://www.eyng.com.br/dicas/detalhe/10/eflorescencia>

Os sais podem ser provenientes do cimento, dos agregados, dos pigmentos, dos aditivos ou das adições minerais constituintes do concreto. No entanto, os sais sozinhos não provocam a eflorescência, esta patologia é ocasionada pela presença de água, a qual pode advir da chuva, do solo ou da própria água de

amassamento (SILVA, 2011). Outros fatores que favorecem o aparecimento de manchas brancas na superfície do concreto são a má compactação, o incorreto armazenamento das peças de concreto e a evaporação ou condensação da água (LIMA, 2006).

A eflorescência ainda pode ser dividida em dois tipos. A eflorescência primária ocorre quando a água é proveniente da própria água de amassamento. E a eflorescência secundária ocorre quando há presença de água externa (ROJAS, 1999 apud. LIMA, 2006).

Evitar a eflorescência é uma tarefa difícil, uma vez que pode ser desencadeada por fatores diversos. Algumas ações preventivas são o correto armazenamento das peças de concreto, impedindo a umidade das peças; um cauteloso processo de cura, minimizando a evaporação e evitando a condensação na superfície de concreto; compactação adequada, de forma a reduzir a porosidade do concreto e dificultando a precipitação dos sais (HARTMANN; BENINI, 2011; LIMA, 2006; SILVA, 2011).

Outra forma de prevenir a eflorescência é a escolha adequada de materiais. O metacaulim, por exemplo, reage com o hidróxido de cálcio causando uma diminuição do pH da água e o refinamento dos poros, dificultando a difusão de água e íons no interior do concreto (BARATA, 2007). Este material foi empregado por Lima (2006) em seu estudo sobre pigmentos pozolânicos, produzidos a partir da combinação do metacaulim e da lama vermelha, materiais residuais encontrados na região do município de Barcarena, no Estado do Pará. A adição do pigmento pozolânico teve efeito extremamente positivo na prevenção da eflorescência. Outro produto no qual o metacaulim vem sendo aplicado é o cimento LC³, demonstrando mais uma vez aspectos positivos para a produção do concreto cromático com este material.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 ESTRATÉGIA DA PESQUISA

A proposta desta pesquisa é analisar o comportamento cromático de argamassas coloridas quando produzidas com cimento LC³, comparando-as com concreto cromático produzido com cimento convencional cinza. A opção por produzir argamassas ao invés de concreto deu-se pela dificuldade de produção do mesmo nas dependências da universidade. Desta forma, o estudo foi realizado visando oferecer parâmetros para a produção de concreto colorido em futuras pesquisas.

Neste trabalho foi proposto uma paleta de cores em tons terrosos (Figura 27), desta forma os pigmentos amarelo, vermelho, preto e marrom foram combinados entre si, produzindo cores diferentes das encontradas no mercado. Desse modo, foi possível avaliar a real capacidade de pigmentação de cada tipo de cimento. Para isto adotou-se a mesma relação água/aglomerante para todas as misturas.

Figura 27: Paleta de cores baseada nos tons da cidade de Belém.

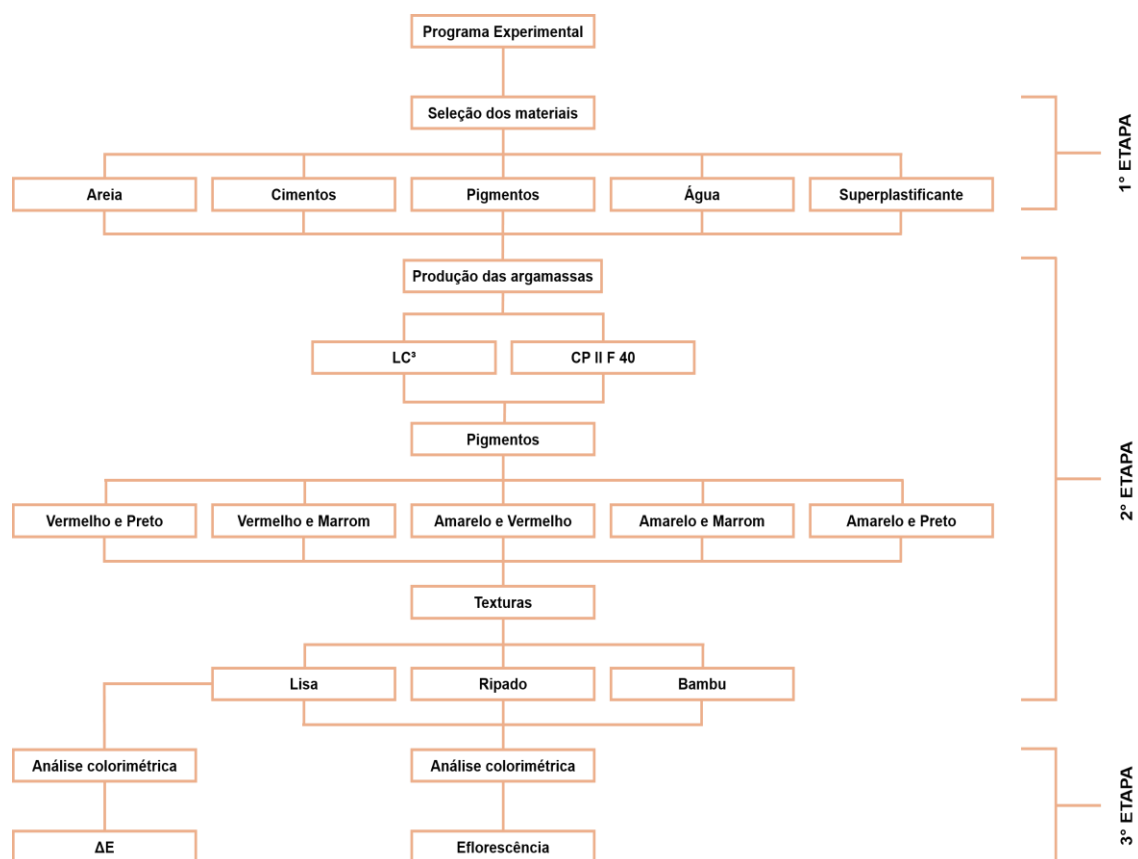


Fonte: <http://www.viajantecomum.com/2018/07/25/dicas-de-belem-do-para/> (Composição elaborada pela autora)

A pesquisa foi realizada em três etapas, organizadas no fluxograma esquemático do programa experimental (Figura 28). A primeira etapa consiste na seleção dos materiais utilizados para a produção das argamassas. A segunda

etapa caracteriza-se pela produção das misturas e adição de texturas nas placas. A terceira etapa dá-se pela análise estética e colorimétrica das amostras, verificando a ocorrência de eflorescência, os parâmetros $L^*a^*b^*$ e a diferença total de cor (ΔE) entre as placas.

Figura 28: Fluxograma esquemático do programa experimental.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE PARTIDA

Na pesquisa foram avaliados o cimento Portland convencional e o cimento LC³. O cimento Portland convencional utilizado foi o CP II F 40, da Votorantim Cimentos, o qual é composto por fíler calcário e possui resistência à compressão superior a 40 MPa aos 28 dias. Já o cimento LC³ foi produzido a partir da adição de metacaulim e calcário ao cimento Portland CP II F 40. O metacaulim utilizado é proveniente do RBC (resíduo do beneficiamento do caulim). O calcário é proveniente das jazidas da região nordeste do Estado do Pará. Foi moído em moinho de bolas durante 3 horas. Para a produção do LC³ foi estimada a substituição de 50% do cimento por metacaulim e calcário, considerando a existência de aproximadamente 21% de calcário no cimento empregado, foi utilizado apenas 5,5% de calcário e 33% de metacaulim.

O agregado miúdo é uma areia quartzosa proveniente de jazidas localizadas na região Nordeste do Pará, de coloração branca, uma vez que terão menor influência na cor final das placas.

Os pigmentos utilizados foram o amarelo, vermelho, preto e marrom, sendo todos fornecidos pela empresa LANXESS. O pigmento amarelo (05651166), o pigmento marrom (05651158) e o pigmento preto (05651204) pigmentos xadrez em pó, no entanto o amarelo é proveniente do hidróxido de ferro (III) – $\text{FeO}(\text{OH})$, o marrom é uma mistura à base de óxido de ferro (III) – Fe_2O_3 – e o preto é produzido a partir do Negro de Fumo⁴ e do etoxilato de monilfenol – $\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$. O pigmento vermelho é um pigmento Bayferrox® (120) proveniente do óxido de ferro (III) – Fe_2O_3 .

⁴ A combustão parcial ou decomposição térmica de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos em condições controladas originam o carbono puro sob a forma de pequenas partículas, chamadas de coloidais, que compõem o Negro de Fumo (ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE NEGRO DE FUMO, 20-?).

4.3 PRODUÇÃO DAS MISTURAS

No trabalho experimental foram produzidas 30 placas de dimensões de 25x25 cm e espessura de 2 cm. A produção das placas consistiu na realização de 15 misturas de cimento CP II F 40 e 15 misturas de cimento LC³, sendo estas provenientes da combinação de 5 tipos de misturas de pigmentos (vermelho e preto, vermelho e marrom, amarelo e vermelho, amarelo e marrom, amarelo e preto) e 3 tipos de texturas propostas (lisa, ripada e bambu). A quantidade de pigmentos empregada obedeceu o valor máximo de 5%, seguindo a proporção fixada entre os pigmentos apresentada na Tabela 2. A relação aglomerante/agregado estabelecida foi de 1:3 e a relação água/aglomerante foi de 0,49. Devido a umidade observada na areia utilizada não foi necessário o emprego de superplastificante nas pastas de CP II F 40. No entanto foi aplicado 1 mL de superplastificante nas pastas de LC³ em decorrência do aspecto seco apresentado pelo material.

Tabela 2 - Proporção de pigmentos para as misturas.

Pigmentos	Proporção
Vermelho:Preto	2:1
Vermelho:Marrom	2:1
Amarelo:Vermelho	3:1
Amarelo:Marrom	3:1
Amarelo:Preto	4:1

Fonte: Elaborado pela autora⁵.

As misturas das argamassas foram produzidas em argamassadeira com capacidade para 1,5 L, sendo que o volume necessário para as placas era de 1,25 L. A Tabela 3 mostra o quantitativo de materiais empregados para as argamassas coloridas com CP II F 40 e a Figura 27 o processo de produção destas argamassas. Para a produção das argamassas de cimento CP II F 40 adotou-se o seguinte padrão:

1. Mistura manual dos pigmentos à seco em recipiente de vidro;
2. Mistura do cimento com os pigmentos na argamassadeira durante 30s;

⁵ Com base nos dados fornecidos pela empresa LANXESS.

3. Adição de água e mistura durante 30s;
4. Adição da areia e mistura durante 2 min.

Tabela 3 - Quantitativo de material, em gramas, para produção de uma placa de argamassa de cimento Portland convencional.

Cimento Cinza					
Mistura de pigmentos	P 1	P 2	CPIIF40	Areia	Água
Vermelho + Preto (2:1)	22,67	11,33	646	2040	336
Vermelho + Marrom (2:1)	22,67	11,33	646	2040	336
Amarelo + Vermelho (3:1)	25,50	8,50	646	2040	336
Amarelo + Marrom (3:1)	25,50	8,50	646	2040	336
Amarelo + Preto (4:1)	27,20	6,80	646	2040	336

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29: a) Materiais utilizados; b) Mistura do cimento com os pigmentos; c) Após adição de água; d) Após adição de areia.



Fonte: Acervo da autora.

A Tabela 4 mostra o quantitativo de materiais empregados para as argamassas coloridas com LC³-50 e a Figura 30, o processo de produção destas argamassas. Para a produção das argamassas de cimento LC³ adotou-se o seguinte padrão:

1. Mistura manual dos pigmentos a seco em recipiente de vidro;
2. Mistura do cimento com os pigmentos na argamassadeira durante 30s;
3. Adição do metacaulim e do calcário, misturando durante 30s;
4. Adição de água e mistura durante 30s;
5. Adição da areia e mistura durante 2 min.

Tabela 4 - Quantitativo de material, em gramas, para produção de uma placa de argamassa de cimento LC³.

LC3								
Mistura de pigmentos	P 1	P 2	CPIIF40	Metacaulim	Calcário	Areia	Água	Superplast.*
Vermelho + Preto (2:1)	22,67	11,33	392,35	202,35	18,77	2040	336	1
Vermelho + Marrom (2:1)	22,67	11,33	392,35	202,35	18,77	2040	336	1
Amarelo + Vermelho (3:1)	25,50	8,50	392,35	202,35	18,77	2040	336	1
Amarelo + Marrom (3:1)	25,50	8,50	392,35	202,35	18,77	2040	336	1
Amarelo + Preto (4:1)	27,20	6,80	392,35	202,35	18,77	2040	336	1

*Em ml

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30: a) Materiais utilizados; b) Mistura do cimento com os pigmentos; c) Adição de metacaulim e calcário; d) Após adição de água; e) Após adição de areia.



Fonte: Acervo da autora.

A produção das placas consistiu na colocação das argamassas dentro das fôrmas de madeira, tendo sido passado previamente vaselina líquida (desmoldante) da marca King, por ser um material incolor. Foi inserida uma malha metálica para atribuir resistência as placas devido a sua espessura delgada. Em decorrência da colocação da malha metálica foi necessária a realização de adensamento manual das argamassas, este processo consistiu em leves batidas com um pilão metálico (Figura 31). A desforma das placas foi realizada após 24h.

Figura 31: a) Fôrma de madeira com desmoldante e malha metálica; b) Pilão metálico.



Fonte: Acervo da autora.

Nas placas com textura lisa o processo foi realizado com uma espátula de aço (colher de pedreiro), sempre observando o nivelamento da superfície (Figura 32a). A textura ripada foi realizada com uma placa de madeira (Figura 32b) aplicada à superfície da argamassa após 10 min da colocação da mesma na fôrma. Sobre a placa de madeira foram colocadas duas placas de argamassa, cada uma com peso de aproximadamente 2 Kg. A placa de madeira foi retirada após 24h, ou seja, no mesmo tempo da desforma. A textura de bambu foi realizada por meio da aplicação da palha sobre a superfície da pasta após 10 min da colocação da argamassa na fôrma (Figura 32c). Sobre a palha foi

colocada uma placa de argamassa com peso de aproximadamente 2 Kg, a placa e a palha foram retiradas 2h após a aplicação.

Figura 32: a) Espátula de aço (colher de pedreiro); b) Placa de madeira; c) Posicionamento da palha sobre a argamassa.



Fonte: Acervo da autora.

4.4 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

As análises realizadas para a determinação das propriedades dos concretos coloridos estão associadas às variáveis de reposta, as quais serão influenciadas pelas variáveis de controle. Nesta análise a variável de reposta será a capacidade de pigmentação e as variáveis de controle serão o tipo de cimento e o tipo de pigmento. O tipo de textura será fixado na lisa, pois não é possível realizar a leitura colorimétrica em superfícies rugosas.

A capacidade de pigmentação alcançada pelos pigmentos em cada tipo de cimento baseia-se na verificação colorimétrica por meio do sistema de cores CIELAB1976 (ΔE_{76}), a partir da obtenção dos parâmetros L^* , a^* , b^* , sendo L^* a luminosidade, a^* a variação vermelho - verde, b^* a variação amarelo – azul. Para este estudo foi utilizado o equipamento denominado de Colorímetro, da marca Delta Color, observador colorimétrico padrão de 10° , iluminação padrão D65 e diâmetro da área de medição de 13 mm. Em conjunto com o Colorímetro foi utilizado o software Lab7, desenvolvido pela Delta Color.

A diferença total de cor (ΔE) foi calculada a partir das medidas obtidas nas placas de mesma combinação de pigmentos e diferente tipo de cimento na idade 14 dias. No entanto, a análise com o colorímetro foi realizada apenas nas placas com textura lisa, uma vez que as placas com textura ripada e de bambu possuem superfície irregular, fator que impede a leitura do equipamento.

Esta análise também consistiu na avaliação visual das placas, observando-se as diferenças de cor entre as placas de cimento CP II F 40 e cimento LC³ de mesma cor e textura. Para esta avaliação também foram analisadas as placas com textura de madeira e bambu. Ademais, foi avaliado o aparecimento de eflorescência nas placas, buscando averiguar a eficiência do LC³-50 com a substituição de cimento por metacaulim e calcário.

Para a análise visual das placas foi montado um estúdio (Figura 33) com uma caixa que teve o seu interior pintado de branco e uma luminária acoplada na parte superior. O fundo utilizado foi o preto e o branco, variando conforme a cor das placas.

Figura 33: Estúdio produzido pela autora.



Fonte: Acervo da autora.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

a. Amarelo e marrom

Nesta combinação dos pigmentos amarelo e marrom nos cimentos CP II F 40 e LC³-50 pode-se perceber uma nítida diferença de tonalidade. Como um dos pigmentos utilizados foi o amarelo, a comparação será baseada no parâmetro b*.

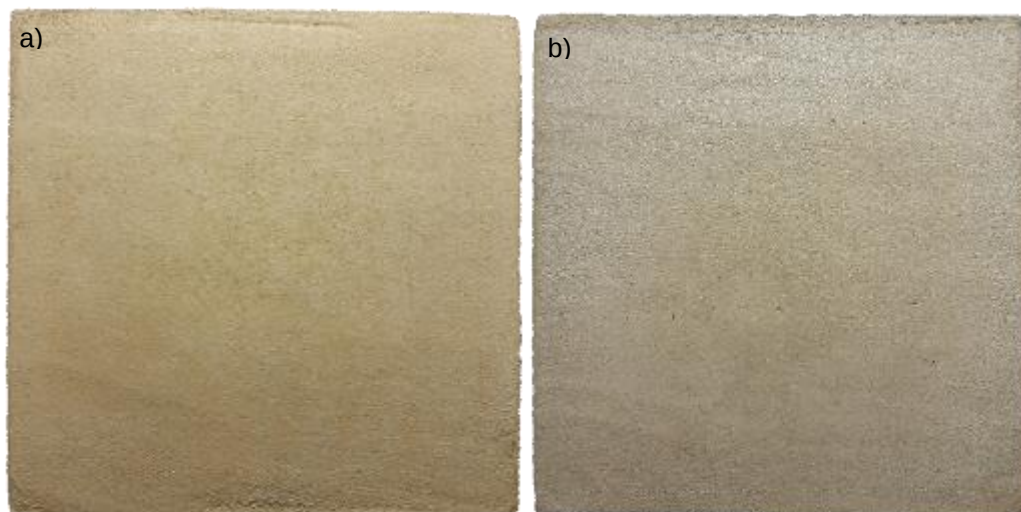
Pode-se perceber que o parâmetro b* mostra que a cor da placa de CP II F 40 tende a se distanciar da cor original do pigmento. Quanto a luminosidade (L*), o CP II F 40 tende a ser mais escuro que o LC³. Como resultado final desta comparação, percebe-se que a diferença total de cor (ΔE) resultou no valor de 7,75, evidenciando a diferença do potencial de pigmentação entre os cimentos (Tabela 5). O parâmetro b* para o LC³-50 foi maior do que para o CP II F 40, o que indica a cor amarela mais intensa do LC³-50. O parâmetro referente à luminosidade (L*) do LC³-50 é maior que a do CP II F 40. Isto se traduz numa cor mais clara, mais aberta. A eflorescência não é evidente nas placas lisas, no entanto, é possível notar o surgimento de um tom mais esbranquiçado nas bordas da placa de CP II F 40 (Figura 34).

Tabela 5 - Parâmetros L*a*b* para cimento CP II F 40 e LC³ com pigmentos amarelo e marrom.

Amarelo + Marrom				
	CP II F 40	LC ³	Δ	
L*	76,09	80,95	ΔL^*	-4,86
a*	6,98	9,01	Δa^*	-2,03
b*	34,51	40,19	Δb^*	-5,68
ΔE				7,75

Fonte: Elaborado pela autora.

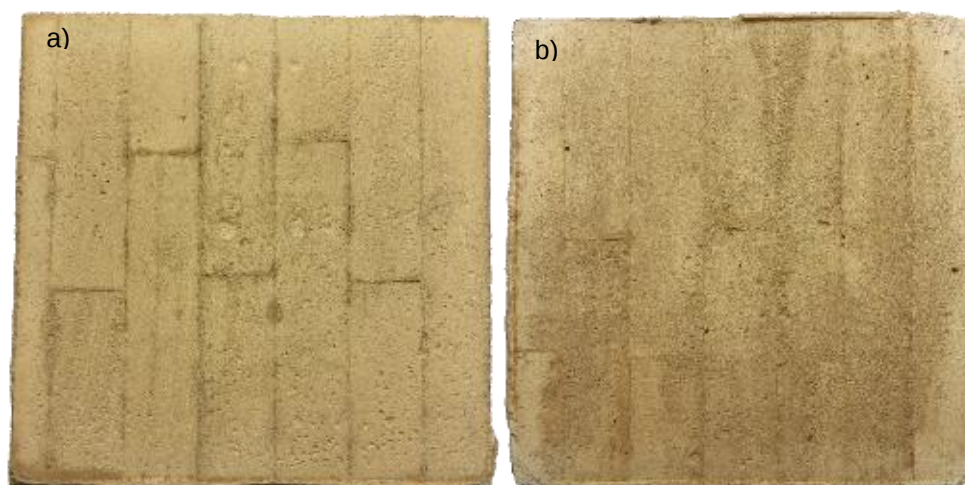
Figura 34: a) LC³ com pigmentos amarelo e marrom, textura lisa; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e marrom, textura lisa.



Fonte: Acervo da autora.

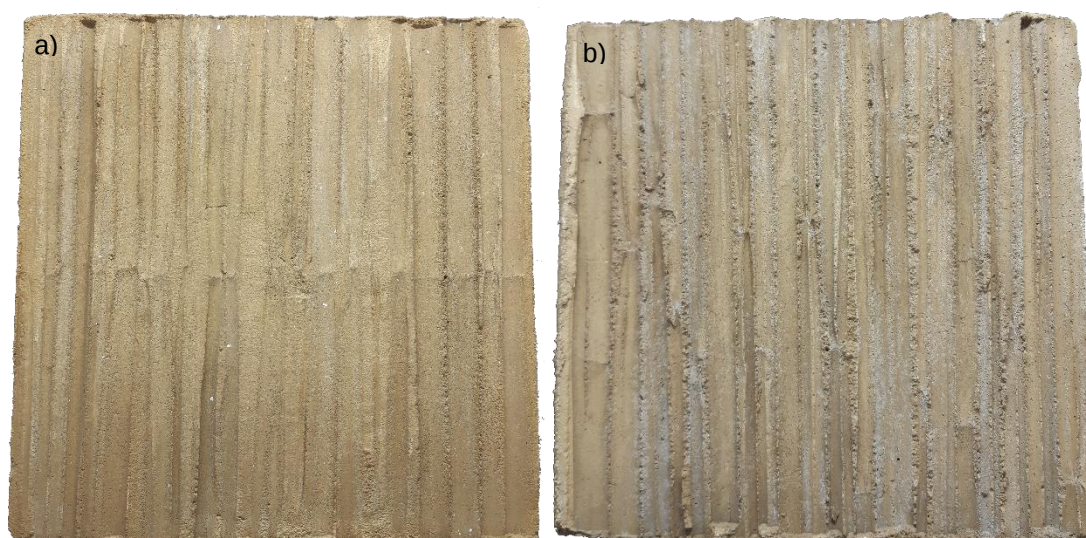
Em relação às placas com textura foi possível notar o aparecimento de eflorescência nas placas de CP II F 40. No caso das placas com textura ripada essa patologia se deu principalmente nas bordas (Figura 35), ao passo que na textura de bambu a eflorescência ocorreu em toda a extensão da placa (Figura 36). Nas placas de LC³-50 percebe-se maior nitidez da textura, além de menor porosidade. Em relação a cor, as placas de LC³-50 apresentam tonalidade mais próxima do pigmento original, enquanto o CPIIF40 tende a uma tonalidade mais acinzentada, que corrobora com os maiores valores dos parâmetros b^* e L^* .

Figura 35: a) LC³ com pigmentos amarelo e marrom, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e marrom, textura ripada.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 36: a) LC³ com pigmentos amarelo e marrom, textura de bambu; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e marrom, textura de bambu.



Fonte: Acervo da autora.

b. Amarelo e preto

A Tabela 6 mostra os parâmetros obtidos na colorimetria para as placas provenientes da combinação dos pigmentos amarelo e preto. A combinação dos pigmentos amarelo e preto resultou em uma tonalidade verde, por esta razão foram comparados os parâmetros a^* de cada placa.

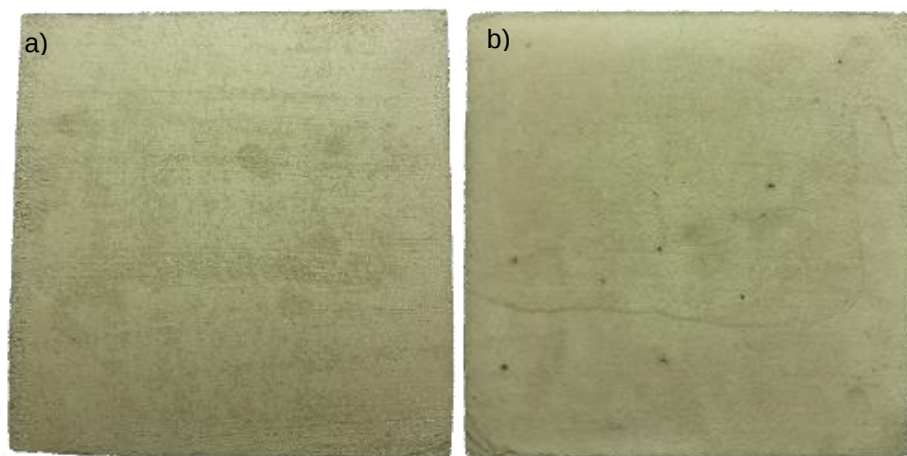
O parâmetro a^* negativo demonstrou a tendência de ambas as placas para o verde, tendo as placas de LC³-50 apresentado uma tonalidade esverdeada mais acentuada, o que representou um valor em modulo maior (1,7) em comparação ao do cimento CP II F40 (1,40). A luminosidade (L^*) também mostrou-se favorável nas placas de LC³, com valores mais positivos do que para o cimento cinza. De modo geral, assim como na combinação dos pigmentos amarelo e marrom, a diferença total de cor (ΔE) entre as placas mostrou-se elevada, sendo favorável ao LC³-50.

Tabela 6 - Parâmetros $L^*a^*b^*$ para cimento CP II F 40 e LC³ com pigmentos amarelo e preto.

Amarelo + Preto				
	CP II F 40	LC ³	Δ	
L^*	71,81	76,67	ΔL^*	-4,86
a^*	-1,42	-1,7	Δa^*	0,28
b^*	26,28	29,95	Δb^*	-3,67
ΔE				6,1

Fonte: Elaborado pela autora.

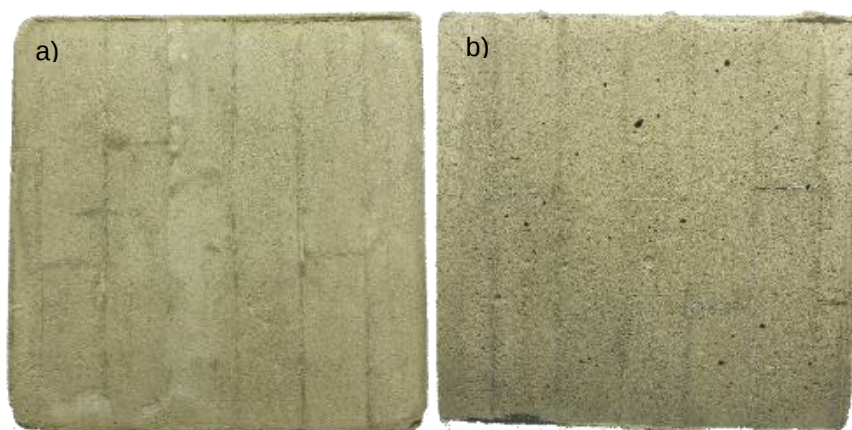
Figura 37: a) LC³ com pigmentos amarelo e preto, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura lisa.



Fonte: Acervo da autora.

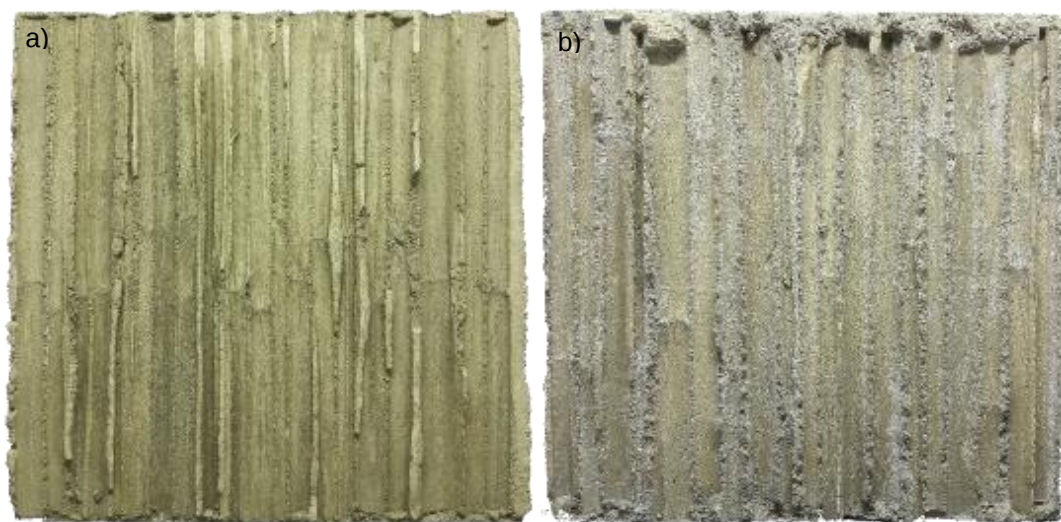
As Figuras 37 a 39 mostram as placas com texturas lisa, ripada e de bambu. Visualmente as placas de textura ripada apresentaram resultado colorimétrico similar às placas lisas. Em contrapartida, as placas com textura de bambu demonstraram acentuada divergência, uma vez que a de CP II F 40 perdeu quase por completo a tonalidade esverdeada, enquanto a de LC³-50 apresenta tonalidade mais intensa, mesmo em comparação às placas lisas e ripadas. A perda de cor da placa com textura de bambu poder ser explicada pelo aparecimento da eflorescência, a qual ocorreu de forma expressiva na placa de CP II F 40. Outra diferença importante foi a maior porosidade apresentada pelas placas de CP II F 40.

Figura 38: a) LC³ com pigmentos amarelo e preto, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura ripada.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 39: a) LC³ com pigmentos amarelo e preto, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e preto, textura de bambu.



Fonte: Acervo da autora.

c. Amarelo e vermelho

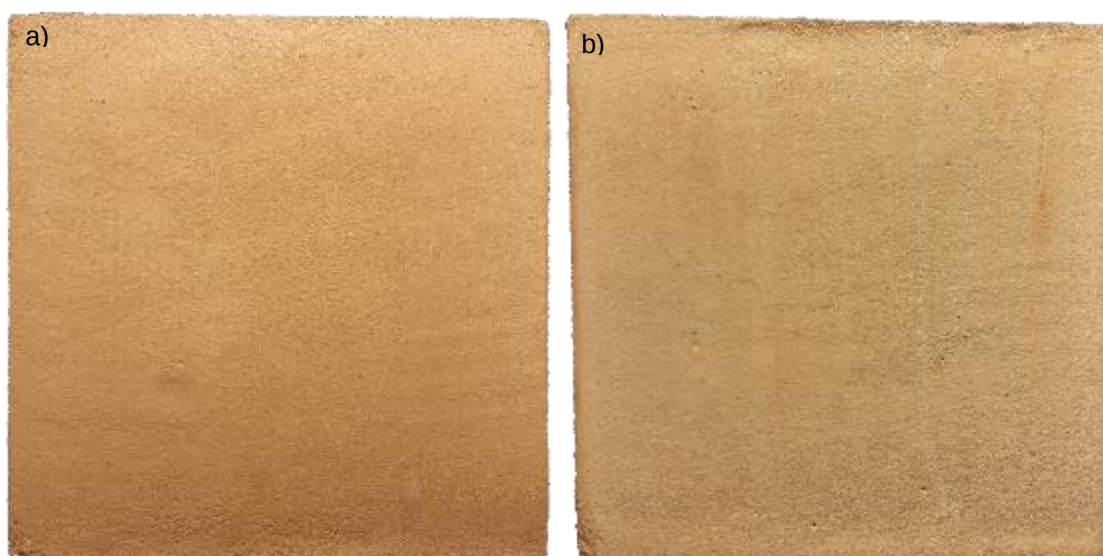
A combinação dos pigmentos amarelo e vermelho resultou em uma tonalidade clara da cor laranja. A Tabela 7 mostra os parâmetros colorimétricos das placas. Nesta mistura serão avaliados os parâmetros a^* e b^* .

De acordo com os dados obtidos no colorímetro, a placa de LC³-50 apresenta maior intensidade dos parâmetros a^* e b^* , ou seja, manteve-se mais fiel as cores originais dos pigmentos empregados na mistura. Estes parâmetros corroboram com a avaliação visual das placas, uma vez que a de LC³-50 apresenta a cor mais viva entre as comparações (Figuras 40 a 42). O parâmetro L^* também colabora para esta conclusão, pois o valor mais elevado para a placa de CP II F 40 decorre da tonalidade mais pálida e esbranquiçada da placa. Como resultado final observamos que a diferença total de cor (ΔE) entre as placas é a mais elevada deste estudo (11,4), em virtude das cores mais abertas dos pigmentos empregados nesta composição. Em outras palavras, para pigmentos mais claros, as cores ficaram mais enaltecidas com o cimento LC³-50. É importante notar que não houve eflorescência em ambas as placas.

Tabela 7 - Parâmetros $L^*a^*b^*$ para cimento CPIIF40 e LC^3 com pigmentos amarelo e vermelho.

Amarelo + Vermelho				
	CP II F 40	LC^3	Δ	
L^*	80,57	74,82	ΔL^*	5,75
a^*	18,74	26,04	Δa^*	-7,3
b^*	39,64	46,24	Δb^*	-6,6
ΔE				11,4

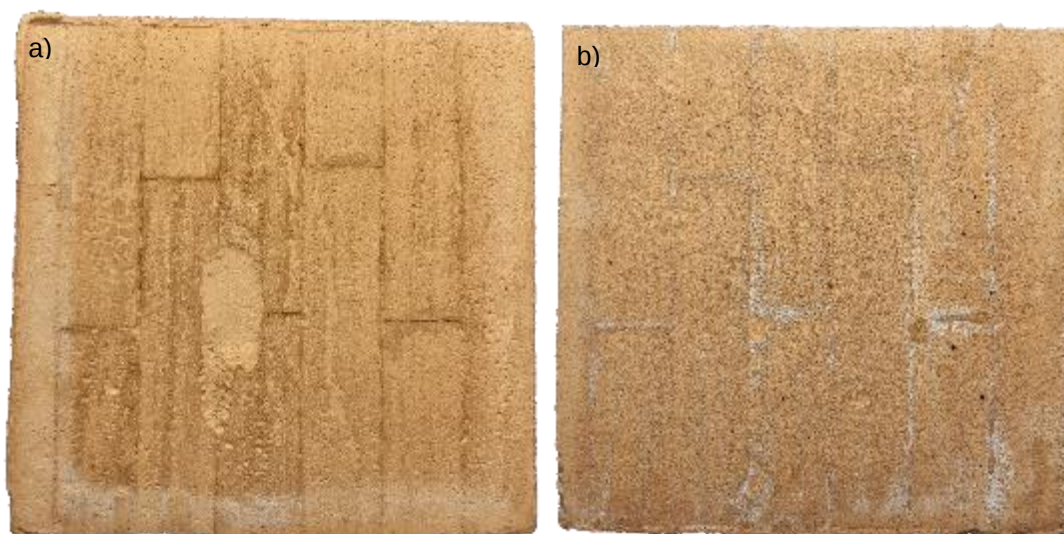
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40: a) LC^3 com pigmentos amarelo e vermelho, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura lisa.

Fonte: Acervo da autora.

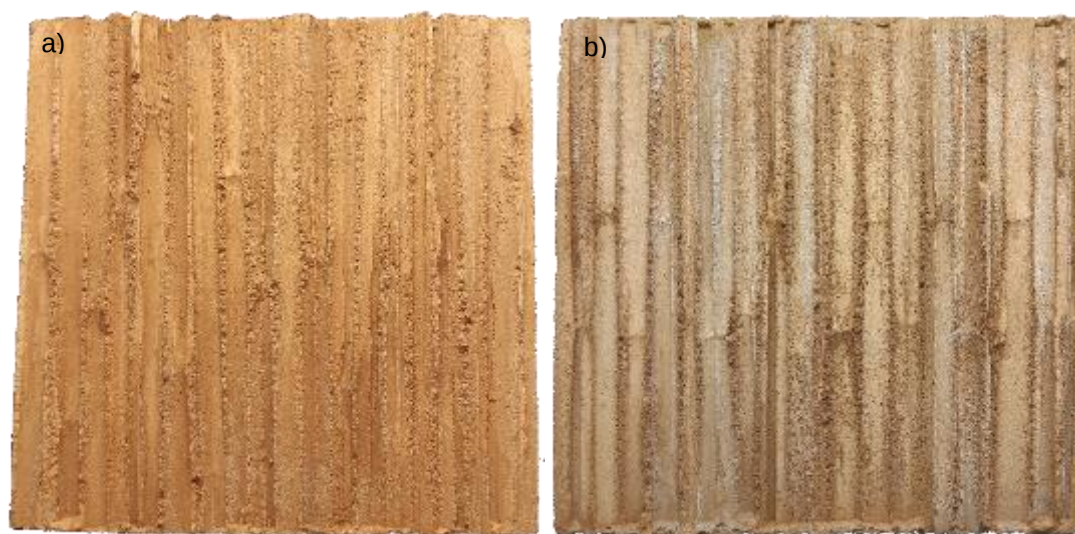
Em relação às placas com textura foi possível notar o aparecimento de eflorescência em ambas as placas com textura ripada, no caso da placa de LC^3 -50 a eflorescência concentrou-se nas bordas inferior e lateral esquerda, já na placa de CP II F 40 a eflorescência ocorreu em toda a sua extensão, com destaque para os pontos de marcação da textura (Figura 41). No caso das placas com textura de bambu, a eflorescência é percebida com maior nitidez nas de CP II F 40, já nas de LC^3 -50 a eflorescência ocorreu de maneira pontual e quase imperceptível (Figura 42). Em relação a cor, as placas de CP II F 40 apresentam uma tonalidade mais pálida, enquanto as de LC^3 -50 possuem tonalidade mais aberta e evidente, conforme determinado nos parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* e (ΔE).

Figura 41: a) LC³ com pigmentos amarelo e vermelho, textura ripada; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura ripada.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 42: a) LC³ com pigmentos amarelo e vermelho, textura de bambu; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos amarelo e vermelho, textura de bambu.



Fonte: Acervo da autora.

d. Vermelho e marrom

A combinação dos pigmentos vermelho e marrom resultou em uma tonalidade de vermelho mais fechada. A Tabela 8 apresenta os parâmetros colorimétricos e as Figuras 43 a 45 mostram a cor e as texturas das placas moldadas com LC³-50 e CP II F 40.

A análise do parâmetro a^* demonstra que a placa de LC³-50 possui tonalidade mais aberta da cor vermelha, pois apresenta valor mais positivo que

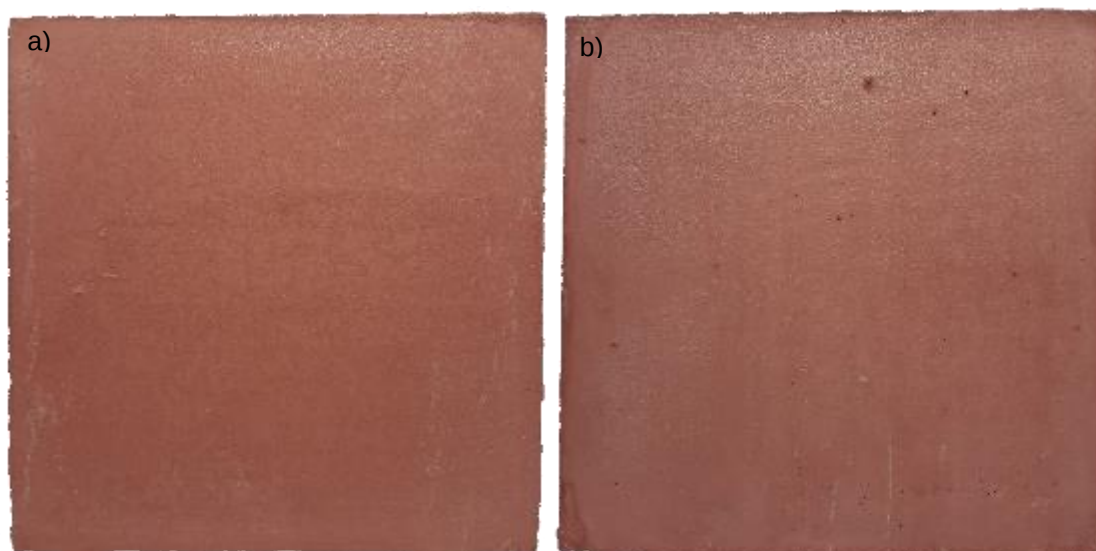
o cimento cinza. A cor mais viva da placa de LC³-50 também é evidenciado pelo parâmetro L*, uma vez que o valor mais elevado para a placa de CP II F 40 decorre da tonalidade mais pálida da placa. Neste caso, apesar de um valor mais baixo em relação as demais misturas de pigmento, ainda percebe-se uma distinção de cores das placas delimitado pela diferença total de cor (ΔE) obtida no colorímetro. As placas com LC³-50 apresentam o vermelho mais intenso que as com CP II F 40

Tabela 8 - Parâmetros L*a*b* para cimento CP II F 40 e LC³ com pigmentos vermelho e marrom.

Vermelho + Marrom				
	CP II F 40	LC ³	Δ	
L*	63,32	60,36	ΔL^*	2,96
a*	26,42	30,05	Δa^*	-3,63
b*	19,63	22,71	Δb^*	-3,08
ΔE				3,26

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43: a) LC³ com pigmentos vermelho e marrom, textura lisa; b) Cimento CP II F 40 com pigmentos vermelho e marrom, textura lisa.

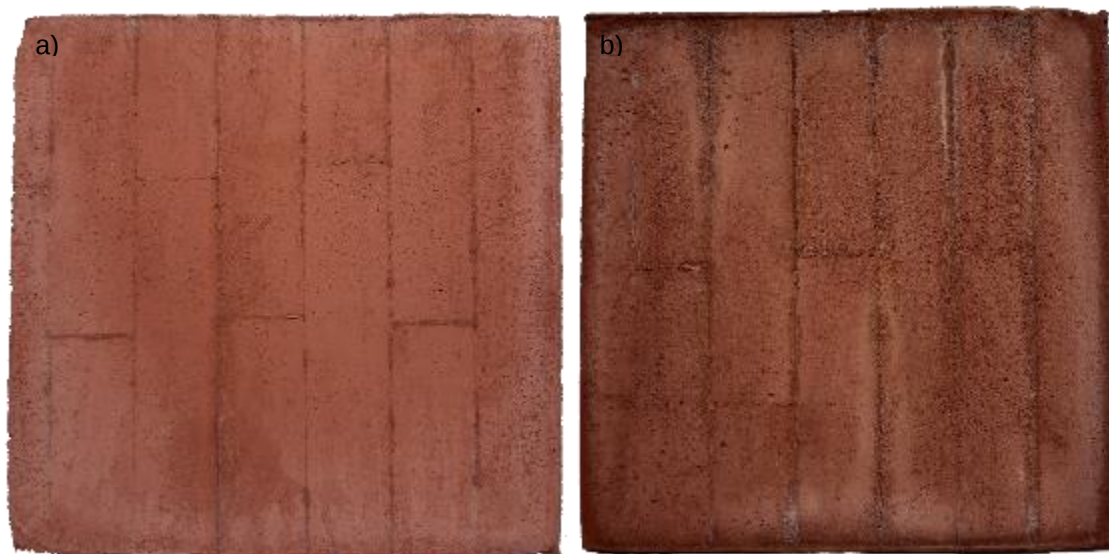


Fonte: Acervo da autora.

Nas placas com textura lisa não se observou sinais de eflorescência. Nas placas com textura ripada constatou-se o aparecimento de eflorescência. No caso da placa de LC³-50, a eflorescência concentrou-se nas bordas da placa, já na placa de CP II F 40 a eflorescência incidiu em toda a sua superfície,

principalmente nas laterais da placa. A eflorescência ocorreu de forma mais evidente nas placas com textura de bambu, principalmente na de CP II F 40, ao passo que nas placas de LC³-50 a eflorescência ocorreu de forma pontual e sutil. A cor foi mais nítida na placa de LC³ com textura de bambu assim como na ripada.

Figura 44: a) LC³ com pigmentos vermelho e marrom, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e marrom, textura ripada.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 45: a) LC³ com pigmentos vermelho e marrom, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e marrom, textura de bambu.



Fonte: Acervo da autora.

e. Vermelho e preto

A combinação dos pigmentos vermelho e preto resultou em uma cor de vinho. Como um dos pigmentos utilizados foi o vermelho, a comparação será baseada no parâmetro a^* . A Tabela 9 apresenta os parâmetros colorimétricos e as Figuras 46 a 48 mostram as diferenças de cor e textura das placas com cimentos LC³-50 e CP II F 40.

A diferença de cor entre as placas é bastante elevada, principalmente pelo aparecimento de eflorescência na placa de CP II F 40. A análise dos parâmetros a^* e L^* demonstram essa diferença. O parâmetro a^* foi mais elevado para a placa de LC³-50 e o L^* para o CP II F 40. Isto significa que a cor é mais intensa para o LC³-50 e o cimento cinza apresentou uma palidez oriunda do aparecimento da eflorescência, manchas brancas em sua superfície. A diferença total de cor (ΔE) entre as placas é a menor deste estudo, mesmo assim demonstra o potencial de pigmentação do LC³. É importante ressaltar o aparecimento de manchas brancas na placa de CP II F 40 em toda a sua superfície, ao passo que a placa de LC³ apresenta maior uniformidade de cor para a textura lisa.

Tabela 9 - Parâmetros $L^*a^*b^*$ para cimento CPIIF40 e LC³ com pigmentos vermelho e preto.

Vermelho + Preto				
	CP II F 40	LC ³	Δ	
L^*	54,58	52,99	ΔL^*	1,59
a^*	15,97	16,99	Δa^*	-1,02
b^*	13,85	15,2	Δb^*	-1,35
ΔE				2,32

Fonte: Elaborado pela autora.

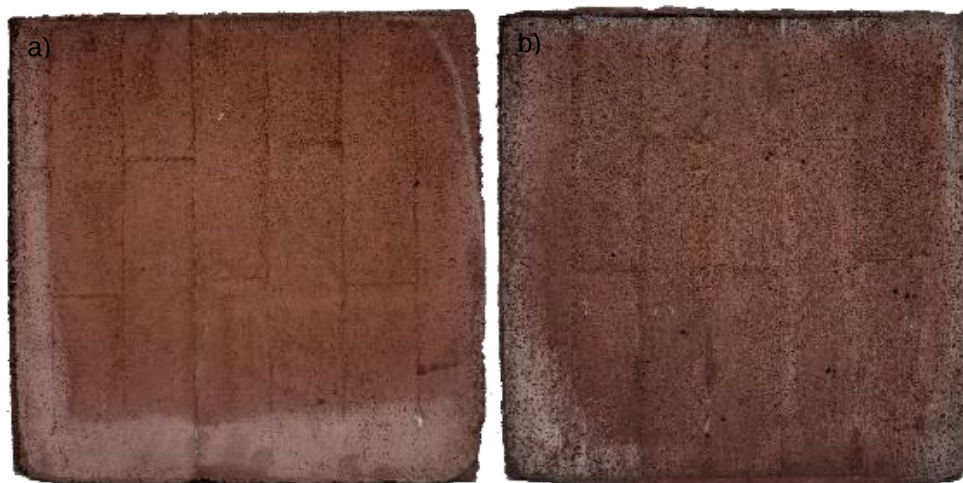
Figura 46: a) LC³ com pigmentos vermelho e preto, textura lisa; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura lisa.



Fonte: Acervo da autora.

Nas placas com textura, independentemente do tipo, ocorreu o aparecimento de eflorescência. No caso das placas com textura ripada, a eflorescência concentrou-se nas laterais das placas, já nas placas com textura de bambu a eflorescência ocorreu em toda a sua extensão. Todavia, a eflorescência deu-se de forma mais acentuada nas placas de CP II F 40. Nestas placas também foi observada elevada porosidade. Mesmo com o aparecimento de eflorescência em todas as placas, as de LC³-50 ainda apresentaram cores mais intensas.

Figura 47: a) LC³ com pigmentos vermelho e preto, textura ripada; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura ripada.



Fonte: Acervo da autora.

Figura 48: a) LC³ com pigmentos vermelho e preto, textura de bambu; b) Cimento CPIIF40 com pigmentos vermelho e preto, textura de bambu.



Fonte: Acervo da autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ampla utilização do concreto deve-se a sua resistência mecânica, durabilidade, baixo custo e flexibilidade de uso. Contudo, o seu potencial estético, explorado principalmente durante o modernismo, tornou-se uma demanda emergente na Construção Civil contemporânea. Dentro deste cenário não só a forma do concreto é explorada, mas também a possibilidade de adicionar cores às estruturas monótonas de coloração cinzenta. Desta forma, a presente pesquisa visou colaborar neste sentido, ao buscar a comparação colorimétrica entre o cimento Portland convencional (CP II F 40) e o LC³.

As considerações finais apresentadas estão baseadas nos resultados obtidos por meio das análises abordadas no capítulo 5, as quais possibilitam estabelecer uma série de considerações acerca do uso do cimento LC³ para possível produção do concreto cromático.

A cor final das placas é uma composição das cores originais dos materiais empregados na sua produção, bem como da dosagem adotada. Neste trabalho foram analisadas placas de argamassas moldadas com cimento CP II F 40 e LC³, combinados à 5 misturas de pigmentos diferentes, considerando o teor máximo de 5%, e 3 tipos de texturas. Avaliou-se a diferença cromática entre os cimentos, utilizando as coordenadas cromáticas do sistema CIELAB ($L^*a^*b^*$), obtidas por meio do Colorímetro, aliado ao estudo paralelo de avaliação visual da cor.

Os resultados obtidos com o colorímetro corroboram com a avaliação visual da cor, uma vez que em todas as comparações realizadas as placas de cimento LC³ obtiveram o melhor resultado. É importante observar que naquelas em que foi empregado o pigmento amarelo obteve-se os melhores resultados, tendo a diferença colorimétrica evidenciada, com destaque para as placas produzidas com a combinação dos pigmentos amarelo e vermelho. Nas placas em que houve a adição dos pigmentos de tonalidades mais escuras, o marrom e o preto, percebe-se uma atenuação da diferença colorimétrica, já que estes pigmentos tendem a causar o mesmo efeito da pigmentação acinzentada do cimento

Portland convencional. No entanto, mesmo com o uso dos pigmentos marrom e preto, ocorreu a melhoria da pigmentação das argamassas com o uso do cimento LC³.

De modo geral, as placas lisas apresentaram aspecto visual satisfatório, sem o surgimento de eflorescência, porém algumas placas de CP II F 40 apresentaram manchas brancas, como a placa com mistura dos pigmentos vermelho e preto, na qual houve manchas em quase toda a sua superfície.

As placas com textura ripada apresentaram aspecto visual de cor similar às lisas, ou seja, placas de LC³ com tonalidades mais intensas de cor em relação às placas de CP II F 40. É importante observar que a textura ripada é mais evidente naquelas produzidas com LC³, sendo melhor delimitada e mais uniforme. Ademais, as placas com textura ripada de CP II F 40 apresentaram porosidade elevada e atípica em decorrência da exsudação. Este fator pode ter contribuído para o aparecimento de eflorescência em sua superfície. A mesma porosidade foi observada na placa de LC³ com mistura dos pigmentos vermelho e preto, a qual também apresentou ligeira eflorescência. Na placa de LC³ com adição de pigmento vermelho e amarelo, a porosidade foi observada de forma mais sutil.

As placas com textura de bambu apresentaram cores mais intensas do que as lisas e com textura ripada, com exceção das placas com adição dos pigmentos amarelo e marrom. Este efeito ocorre devido a rugosidade da superfície que reflete a luz em direções diferentes e causa um efeito de luz e sombra, o qual altera a percepção da cor. Mesmo nestas placas, o LC³ mostrou-se mais vantajoso, produzindo cores mais vivas do que as de CP II F 40. Assim como nas de textura ripada, foi observada porosidade e eflorescência nas placas de CP II F 40, prejudicando a cor final das placas. Nesta situação as placas de LC³ também apresentaram porosidade de forma mais sutil em relação às de CP II F 40, porém não apresentaram sinais de eflorescência ou prejuízos a cor da sua superfície, com exceção da placa com pigmento vermelho e preto.

Em suma, o emprego de cimento LC³-50, além das vantagens ambientais e técnicas referentes ao concreto estrutural, já conhecidas da literatura, configura-se como uma alternativa de baixo custo para produção de concreto colorido e

com desempenho melhor que o do cimento cinza, pois as cores ficaram mais evidentes e a eflorescência foi substancialmente reduzida.

6.2 CONCLUSÕES

A realização da pesquisa permitiu coletar informações que corroborassem com as hipóteses apresentadas neste trabalho, além da elaboração de algumas conclusões apresentadas a seguir.

- A substituição parcial do cimento por metacaulim e calcário proporcionou a obtenção de um material mais claro, que por sua vez possibilitou a produção de placas com cores mais intensas em relação às placas sem substituição do cimento por adições minerais. Este resultado permite que os pigmentos sejam empregados em teores menores;
- A adição de metacaulim e calcário é capaz de controlar a eflorescência comumente observada em concretos cromáticos, devido o refinamento dos poros, como observado nas placas de argamassa produzidas com LC³;
- A mistura de pigmentos proporciona cores distintas das oferecidas no mercado. Contudo, a combinação entre os pigmentos precisa ser analisada com maior profundidade, levando em consideração as diferentes características químicas e físicas dos pigmentos;
- Os pigmentos vermelho e preto apresentam maior instabilidade, uma vez que a porosidade e a eflorescência foram mais evidentes nas placas em que estes pigmentos estavam presentes, especialmente naquelas em que houve a combinação dos pigmentos vermelho e preto;
- O uso de vaselina líquida como desmoldante não causou manchas nas superfícies das argamassas;
- A aplicação de texturas à superfície do material modifica a percepção visual de cor, principalmente quando apresentam rugosidade elevada;
- O LC³ possibilita a produção de diversos produtos que utilizam atualmente o Cimento Portland cinza ou branco, como placas cimentícias, concreto armado, blocos de concreto, piso de concreto, telhas cimentícias, placas pré-fabricadas de argamassada armada, piso intertravado, revestimentos cimentícios, entre outros. No entanto,

vale ressaltar que a produção destes materiais utilizando o LC³ deve ser avaliada além dos seus benefícios estéticos, mas também de resistência e durabilidade.

Este trabalho apresentou conclusões consideradas importantes, porém estão associadas aos materiais e métodos experimentais empregados especificamente nesta pesquisa. Portanto, sua generalização deve ser feita com atenção e corroborada por trabalhos suplementares.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Cíntia Alves. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão**. Porto Alegre: UFRS, 2006, 88 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira; NOBRE, Thiago Ricardo Santos. Estudo da penetração de cloretos em concretos moldados com cimento Portland branco através de ensaios não acelerados: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270824285_ESTUDO_DA_PENETRA CAO_DE_CLORETOS_EM_CONCRETOS_MOLDADOS_COM_CIMENTO_P ORTLAND_BRANCO_ATRAVES_DE_ENSAIO_NAO_ACELERADO_RESULT ADOS_PRELIMINARES> Acesso em: 30 jul. 2019.

ANDRÉS, L. M. V.; ANTONI, M. G.; DIAZ, A. A.; HERNÁNDEZ, J. F. M.; SCRIVENER, K. L. Effect of fineness in clínquer-calcined clays-limestone cements. **Advances in Cement Research**, v. 27, n. 9, p. 546-556, 2015.

ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTINERA, F., SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1579-1589, 2012.

ANTONI, Mathieu. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. Tese de doutorado, Faculté des Sciences et Techniques de L'Ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**: Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE NEGRO DE FUMO. **Guia do utilizador do Negro de Fumo**. [S.l]. Disponível em: <<http://www.cabotcorp.de/~media/files/product-stewardship/industry-user-guides/international-carbon-black-association-icba-user-guide-portuguese.dpf>>. Acesso em: 07 dez. 2019.

AVET, F., SNELLINGS, R., DIAZ, A. A., HAHN, M. B., SCRIVENER, K. L. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cemente and Concrete Research**, v. 85, p.1-11, 2016

BALIEIRO, Cristiani P. Guessi. **As novas possibilidades cromáticas dos materiais empregados na arquitetura contemporânea paulista e suas relações com a cidade**: o caso da Vila Olímpia. 2015. 189 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos caulíníticos Das indústrias e de beneficiamento de caulim da região Amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. 2007. 396 f. Tese de Doutorado em Geoquímica, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BARIN, Daniel Sacchet. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. **Estudio de hormigones convencionales elaborados con cemento gris y cemento blanco utilizando aditivo de doble efecto**. In: JORNADAS DE DESAROLLO E INNOVACIÓN, 4, nov. 2002a. Disponível em: < <https://pt.scribd.com/document/128413682/cecon-057>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

BISHNOI, S.; MAITY, S.; MALLIK, A.; JOSEPH, S.; KRISHNAN, S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: The Indian experience. **Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, p. 22-28, 2014.

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT. **Activity Report 2015**. (2015) Disponível em: <http://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport_cembureau.pdf>. Acessado em: 4 jul. 2019.

CÉSAR, João C. de Oliveira. **NCS: Natural Color System e possíveis aplicações no projeto arquitetônico**. Revista Pós, v. 17, n. 27, p. 194-207, São Paulo, junho 2010.

COELHO, F.C.A. **Variación del color y textura de hormigones vistos com adcion de pigmentos inorgânicos, 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, Adnan. Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with White Portland cement. **Construction and Building Materials**. v. 22, p. 2276-2280, 2008.

CONCEIÇÃO, Léo Borges da. **Estudo da tecnologia de aplicação do concreto colorido em habitações de interesse social**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. **Cemente and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 719-730, 2005.

DELLINGHAUSEN, L. M.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; VEIGA, K. K. Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 49-65, out./ dez. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Sumário Mineral Brasileiro 2016. In: AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. BRASIL. **Sumário Mineral**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral>>. Acesso em: 3 jul. 2019.

FERNANDES, P. H. C. **Estudo sobre a influência do massará no processo de formação de salitre em rebocos na região de Teresina – PI.** Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

FERNANDEZ LOPEZ, Rodrigo. **Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries.** Tese de doutorado, Faculté des Sciences et Techniques de L'Ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2009.

FONSECA, A. Adão; NUNES, Angela. Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural. In: JORNADAS DE ESTRUTURAS DE BETÃO, 1998. **Anais...** Portugal: FEUP, 1998.

GARCIA, E., CABRAL JUNIOR, M., QUARCION, V.A., CHOTOLI, F. F. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzido nos principais polos ceramistas do estado de S. Paulo.** Cerâmica, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, 2015.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cementand Concrete Research**, 15 de jun. de 2015. 126–142.

GEYER, André Luiz Bortolacci. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** Porto Alegre: UFRS, 2001, 238 f. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GOMES, João António Correia. **Betão. Materialidade e expressão arquitetônica.** Da observação à experimentação. 2015. Dissertação de mestrado - Faculdade de Arquitetura, Universidade do Porto, Porto, 2015.

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

HARTMANN, C.; BENINI, H. Concreto Arquitetônico e Decorativo. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v. p.1645-1681.

HOPPE FILHO, Juarez. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

IEA, WBCSD. **Cement technology roadmap shows how the path to achieve CO₂ reductions up to 24% by 2050**. 2018.

ISAKSSON, R. Process based system models for detecting opportunities and threats—the case of World Cement Production. **International Journal of Quality and Service Sciences**, v. 8, n. 3, p. 246-262, 2016.

ITALCEMENTI. **TX Active – Il principio attivo fotocatalitico**. Disponível em: <<https://www.italcementi.it/it/txactive-principio-attivo>>. Acessado em: 29 jul. 2019.

JOSEPH, S.; JOSEPH, A. M.; BISHNOI, S. Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC³) in India. In: **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. Springer, Dordrecht, 2015. p. 501-507.

KATZ, Ammon. 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.; PASSUELO, A.; MOLIN, D. C. C. D.; SILVA FILHO, L. C. P. Concreto Branco. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v. p.1683-1730.

KIRCHHEIM, Ana Paula. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003.

KONICA MINOLTA. **Comunicação precisa da cor**. [20-?]. Konica Minolta Sensing Americas, Inc. Disponível em: <<http://sensing.konicaminolta.com.br/learning-center/color-measurement/>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

KULIFFAYOVÁ, M.; KRAJCI, L.; JANOTKA, I., SMATKO, V. Thermal behaviour and characterization of cement composites with burnt kaolin sand. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 33, n. 12, p. 1939-1947, 2012.

LIMA, Fádia S. Silva. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínítico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos de cimento Portland**. 2006. 133 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

LINS, Diana Nascimento. **Análise da resistência à compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LOTHEBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848-860, 2008.

LUBECK, André. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. Santa Maria: UFSM, 2008, 142 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

NAVISK, Joe. Using metakaolin in decorative concrete mixes. **Concrete Construction Magazine**, 1 ago. 2006. Disponível em: <https://www.concreteconstruction.net/products/decorative-concrete-surfaces/using-metakaolin-in-decorative-concrete-mixes_o>. Acesso em: 09 ago. 2019.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006.

OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico; DAMINELI, Bruno Luís; AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley Moacyr. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente construído**. Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

PASSUELO, A.; KIRCHHEIM, A. P.; SILVA FILHO, L. C. P.; DAL MOLIN, D. C. C. Análises de sistema de proteção para concreto branco estrutural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48, 2006, Rio de Janeiro. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006.

PASSUELO, Alexandra. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. 2004. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

PIOVESAN, Angela Zamboni. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedade de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco**. Porto Alegre: UFRS, 2009, 155 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **White cement**. Illinois: Portland Cement Association, 2014. Disponível em: <<https://www.cement.org/for-concrete-books-learning/materials-applications/architectural-and-decorative-concrete/white-cement>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **White surfaces reflect light better than darker surfaces!** Disponível em: <http://www.lehighwhitecement.com/wp-content/uploads/2019/01/Concrete-Report-White_Surfaces_Reflect-Better_than_Dark_Surfaces.pdf> Acesso em: 30 jul. 2019.

SCRIVENER, K. L. MARTIRENA, F. BISHNOI, S. MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**. v. 114, p. 49-56, 2018.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, K.L. UN, Environment. JOHN, V.M. GARTNER, M.E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2017.

SILVA, Isabelly T. dos Santos. **Identificação dos fatores que provocam eflorescência nas construções em Angicos/RN**. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Angicos, Rio Grande do Norte, 2011.

SIQUEIRA, Henrique Carvalho. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. Santa Maria: UFSM, 2008, 141 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SOLUÇÕES sustentáveis de pigmento com alta performance para concreto colorido. Direção de Gabriel Regino; Nitemar Vieira. Produção de Gabriel Regino; Nitemar Vieira. Realização de AECweb. Intérpretes: Gabriel Regino; Nitemar Vieira. Roteiro: Gabriel Regino; Nitemar Vieira. [S.l.]: AECweb, 2018. (79 min.), son., color. Web Seminários Tecnologia e Construção. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/webseminarios/tecnologia-e-construcao/concreto-colorido/concreto-colorido.html>>. Acesso em: 18 jul. 2019.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Engenharia Civil/Civil Engineering**. Portugal, n. 15, p. 45-54, 2002.

SOUZA, Paulo Sérgio Lima. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Porto Alegre: UFRS, 2009, 203 f. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TECNOLOGIA do concreto armado. Calçadão de Ribeirão Preto em concreto colorido. **Tecnologia do Concreto Armado**. São Paulo: ABCP, ABESC, IBRACON, a.5, n.14, p.8-9, 2002.

TIRONI, A; TREZZA, M. A., SCIAN, A. N., IRASSAR, E. F. **Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays**. JTherm Anal Colorim. 117: 547-556, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.