

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DA CAL HIDRATADA E PIGMENTO EM MICROCONCRETOS COLORIDOS

INFLUENCE OF THE ADDITION OF HYDRATED LIME AND PIGMENT IN COLORED MICROCONCRETE

Jose Wellyngton Nunes Floro¹
Simone Perruci Galvão²

RESUMO

É notória a inovação da indústria da construção civil em relação ao desempenho do concreto e sua influência arquitetônica, daí a importância de estudos científicos com base em novas composições. Neste trabalho foram produzidos microconcretos coloridos e de alta resistência utilizando-se 2 tipos de cimento Portland e, incorporando à mistura, cal hidratada (CH I). Foram adotados um traço de referência sem pigmento e sem a cal (dosados com cimento Portland tipo V – CP V e cimento Portland branco estrutural – CP B), e outros traços, um para cada tipo de cimento, sendo adicionado o pigmento e outros com a adição de pigmento e da cal. Para os traços dosados com o pigmento e com a cal, foram adicionados um teor de pigmento de 5% e um teor de cal de 15%, ambos, em relação à massa do cimento. A influência tanto do pigmento quanto da cal na resistência à compressão e na coloração foi verificada aos 28 dias de idade. A consistência do microconcreto foi analisada através do ensaio do flow table (NBR 13276, 2002). Pelas análises, constatou-se que o microconcreto produzido com CP B apresentou cores mais intensas. Com relação à resistência à compressão axial, observou-se que o melhor desempenho foi obtido nos concretos com pigmento, sendo o melhor resultado obtido para o concreto com o cimento CP B e pigmento, com um incremento de 31,67%, em relação ao microconcreto padrão. Com relação à consistência foi observado um maior espalhamento nos concretos produzidos sem a cal no traço.

Palavras-Chave: microconcreto colorido; pigmento; cal hidratada; resistência à compressão; trabalhabilidade.

ABSTRACT

The innovation in the construction industry regarding concrete performance and its architectural influence is notable. Hence the importance of scientific studies based on new compositions. In this study, high-strength colored microconcretos were produced using two types of Portland cement, incorporating hydrated lime (CH I) into the mixture. A reference mix without pigment and without lime (dosed with Type V Portland cement - CP V and white structural Portland cement - CP B) was adopted, as well as other mixes, one for each type of cement, with pigment added and others with pigment and lime added. For the mixes dosed with pigment and lime, a pigment content of 5% and a lime content of 15%, both in relation to the cement mass, were added. The influence of both pigment and lime on compressive strength and coloration was verified at 28 days of age. The microconcrete consistency was analyzed through the flow table test (NBR 13276, 2002).

¹ Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2023.

² Doutora em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

The analysis showed that the microconcrete produced with CP B had more intense colors. Regarding axial compressive strength, the best performance was observed in pigmented concretes, with the best result obtained for the concrete with CP B cement and pigment, showing an increase of 31,67% compared to the standard microconcrete. Regarding consistency, a greater slump was observed in the concretes produced without lime in the mix.

Keywords: colored microconcrete; pigment; hydrated lime; compressive strength; workability.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está sempre em desenvolvimento e existe uma preocupação clara em inovação, funcionalidades e desempenho aliados à preocupação com redução de gastos e impactos ambientais. Nesta linha e na busca por novos materiais, vem sendo desenvolvido ao longo dos anos o concreto colorido e de alta resistência, com o desafio de ser mais econômico, mais ecológico, mais durável e mais atraente (PASSUELO,2004), tendendo a ganhar cada vez mais o mercado da construção civil.

O estudo de cada componente do concreto colorido e de alta resistência é importante para garantir a melhoria de suas propriedades. Seguindo esta concepção, as adições minerais pozolânicas são de extrema importância, pois propiciam grandes melhorias nas propriedades de concretos e argamassas devido ao seu efeito pozolânico.

O elevado teor de sílica reativa (SiO_2), presente na adição mineral, propicia a reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), presente na fase cimentícia hidratada, favorecendo a formação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do concreto; além de propiciar o refinamento do tamanho dos poros e dos grãos na pasta hidratada aumentando a compacidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Tal reação também reduz o calor de hidratação (BARRAL, 2007).

A sílica ativa, por exemplo, possui ação química funcionando como um material pozolânico de alta reatividade, por ser constituída de sílica amorfa e ter elevada superfície específica (13.000 a 30.000 m^2/kg) (KULAKOWSKI,2002).

Outros ingredientes adicionados à pasta cimentícia podem ajudar a melhorar o desempenho de argamassas e concretos, entre estes, a cal hidratada. Este componente é um aglomerante aéreo ao qual teoricamente se repõe na pasta uma reserva adicional de hidróxido de cálcio, favorecendo as reações pozolânicas (MENDES; SOUZA e BARBOSA, 2019).

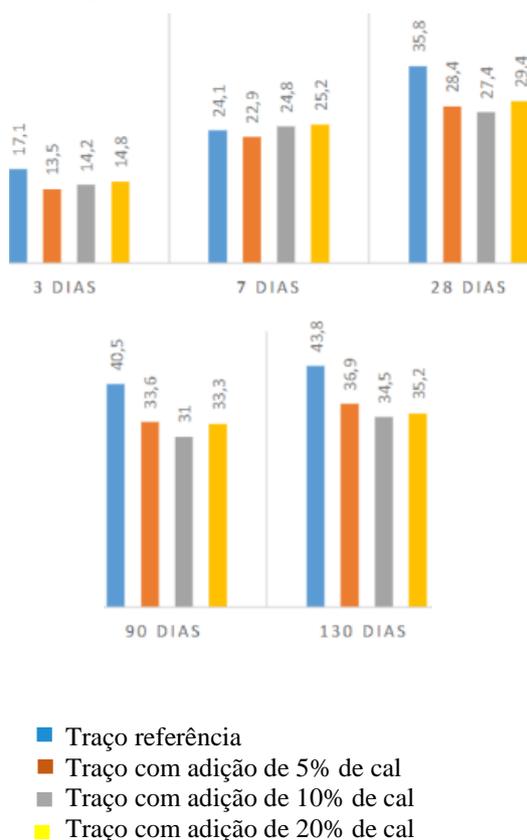
Silveira (2004) ao analisar concretos com alto teor de cinza volante (com 50% de adição, em substituição ao cimento) e adição de cal (com teor de 20%, em relação à massa do cimento), associou uma maior reserva de umidade interna nos corpos de prova à formação de C-S-H, durante o período de cura, e maior presença de Ca(OH)_2 . Estes efeitos, segundo o O autor, se deram devido a cal ter uma maior capacidade de reter água. Através desta análise, o O autor concluiu que os valores de resistência à compressão superiores dos traços com a cal se deram em virtude destes dois fatores.

Mendes, Souza e Barbosa (2019), afirmam que, em argamassas a utilização da cal propicia propriedades importantes em relação ao uso, tais como: consistência adequada à aplicação

na mistura fresca, aumentando o rendimento do material, promove a redução do atrito entre as partículas dos agregados; em alguns casos pode proporcionar uma proteção das armaduras, visto que torna a pasta de concreto mais alcalina. Desde 2002, pesquisadores estão estudando a aplicação de cal hidratada em concretos com alto teor de adições minerais, utilizando-a para aumentar a alcalinidade do concreto (MENDES; SOUZA e BARBOSA, 2019).

No estudo desenvolvido por Mendes, Souza e Barbosa (2019), foi estudada a influência da cal hidratada, em substituição à massa do cimento, nos teores de 5, 10 e 20%, em relação ao traço de referência (sem a cal), Gráfico 1.

Gráfico 1- Evolução da resistência à compressão dos grupos de concreto em MPa



Fonte: Adaptado de Mendes, Souza e Barbosa, 2019.

Mendes, Souza e Barbosa (2019), constataram que a cal hidratada

propiciou melhora na trabalhabilidade do concreto em todas as faixas de concentração, ensaiadas no Slump Test. Segundo os autores, o traço com 20% de cal se destacou, pois ele preencheu os vazios do concreto, diminuindo assim o atrito entre seus componentes, o que facilitou seu manuseio e sua compactação durante a moldagem do corpo de prova.

No entanto, ainda de acordo com o estudo de Mendes, Souza e Barbosa (2019), foi observado que quanto à resistência à compressão, os concretos de traços com adição de cal atingiram valores inferiores ao traço referência (sem adição de cal), embora todos os grupos de concreto ensaiados tenham excedido o valor de 30 MPa (projeto), em 90 dias, e continuaram ganhando resistência.

Em outro cenário, Sharma e Singh (2023), em um estudo que avaliou a incorporação de pó de vidro e cal hidratada, em adição parcial ao cimento, para produção de um concreto, concluíram que o uso combinado de pó de vidro (15%) e cal hidratada (30%) melhoraram a microestrutura e aumentaram atributos relacionados à resistência à compressão, tração na flexão e resistência à tração aos 28 dias.

A influência da cal na composição de concreto foi estudada também por Dhanesh e Shanmugasunraram (2023), em um trabalho que examinou os efeitos da utilização de uma combinação de Escória de Alto Forno Moída e Cal Hidratada. Os autores observaram em seu estudo que as melhores propriedades mecânicas e microestruturais do concreto misto ternário foram obtidas com as proporções de 60% de Cimento Portland Comum + 30% de Escória + 10% de Cal Hidratada, com relação água-aglomerante de 0,36, após 28 dias de cura.

Assim como no estudo de Dhanesh e Shanmugasunraram (2023),

em todos os estudos analisados há uma incorporação da cal na mistura normalmente entre 10-20%, em substituição ao cimento. Quando comparada a um traço/composição, sem adição deste aglomerante, os resultados dos parâmetros mecânicos podem ou não ser melhorados, vai depender principalmente do teor e da adição mineral adotada no estudo.

Como definido por Barcaji (2018):

“O microconcreto é um concreto composto por cimento Portland, agregados devidamente caracterizados e aditivos que controlam o comportamento do concreto no estado plástico. Em função da baixa relação a/aglom (água/aglomerante) e por ser composto apenas por materiais finos, sua porosidade é reduzida se comparada aos outros concretos, tornando-se menos permeável e, conseqüentemente, mais durável.”

Quando desenvolvido com controle tecnológico rigoroso, assim como com adições minerais e aditivos químicos apropriados, o microconcreto pode ser definido como “de alto desempenho” quando atingir valor superior a 50 MPa no ensaio de resistência à compressão, como cita a NBR 6118 (2014) e apresentar características como: baixa permeabilidade, alta durabilidade e baixa relação água-cimento.

Adicionando-se pigmento a esta mistura prévia do microconcreto e promovendo a mudança da sua tonalidade cinza convencional, tem-se o microconcreto colorido e de alta resistência.

Motivado pela falta de precisão dos estudos nessa área quando se trata de um microconcreto colorido e de alto desempenho, esse artigo busca demonstrar o efeito da cal hidratada e sua influência nas propriedades deste material. Utilizou-se neste estudo, dois tipos de cimento, sílica ativa, pó

calcáreo, aditivo superplastificante, cal hidratada e pigmento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Classificação do Estudo

A pesquisa é de ordem experimental, quantitativa, uma vez que foram realizados ensaios em laboratório com propósito de avaliar a resistência à compressão axial de um microconcreto de alta resistência, com adição de cal (15%) e pigmento (5%), ambos adicionados em relação à massa do cimento. Foram estudados traços dosados com Cimento Portland tipo V, de alta resistência Inicial e resistente a sulfatos (CP V-ARI RS) e Cimento Portland Branco Estrutural (CP B).

Procedimento de coleta de dados

As atividades práticas deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção da UFRPE-UACSA, os procedimentos para realização das dosagens foram feitos a partir dos métodos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e das referentes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com realização dos ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739, 1994) e consistência normal (NBR 13276, 2002).

Materiais

Para a produção do concreto deste estudo foram utilizados:

- I. Dois tipos de cimentos:
 - a. Cimento Portland CP-V ARI RS;
 - b. Cimento Portland Branco estrutural (CP B).
- II. Pigmentos vermelhos a base de óxido de ferro.

- III. Água, fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).
- IV. Brita, com diâmetro máximo característico de 6,3 mm.
- V. Areia lavada, com módulo de finura de 3,28 e com diâmetro máximo característico de 4,8 mm.
- VI. Sílica ativa, produzida pela Ferbasa.
- VII. Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 4000, fabricado pela Mc Bauchemie.
- VIII. Pó de quartzo.
- IX. Cal hidratada, tipo CH – 1.

Os teores de cada material utilizados nos traços, foram: pigmento (5%), sílica ativa (15%), aditivo químico (3%), pó de quartzo (20%) e cal hidratada (15%), todos dosados em relação à massa do cimento.

O Cimento CP V – ARI RS foi escolhido como objeto deste estudo devido a sua maior finura e, portanto, maior desenvolvimento da resistência em idade inicial, sendo um material interessante para a produção de concreto de alto desempenho (CAD). De acordo com o fabricante Cimento Nacional, o CP V – ARI RS possui densidade: 2,99 g/cm³ ou 2900 kg/m³ e massa específica aparente: 1,2 g/cm³ ou 1200 kg/m³.

Já o Cimento Portland Branco Estrutural foi escolhido por possuir coloração branca, permitindo que, com um menor teor de pigmentação, se consiga uma tonalidade mais acentuada dos artefatos de cimento, pisos e peças estruturais aparentes, produzida com este material. De acordo com o fabricante, Adana Cimento, o CP B possui densidade entre: 2,75 e 3,20 g/cm³; área superficial: 5340 cm²/g e resistência à compressão para 28 dias: 42,5 a 62,5 MPa.

Para a composição dos microconcretos coloridos foram desenvolvidos traços dosados em massa,

um para cada tipo de cimento, a partir de um traço base (TB) sem pigmento e sem cal. Aos outros microconcretos foram introduzidos o pigmento (TP) e também o pigmento e a cal (TPC).

Vale salientar que, cada traço foi realizado com os dois tipos de cimento (CP V e CP B) e foram dosados utilizando a relação água/cimento (A/C) nos traços sem a presença de cal e água/aglomerante (A/G) nos traços onde a cal foi adicionada a mistura. Os traços estão apresentados abaixo, nos seguintes quadros (Quadro 1 ao 6 - com seus respectivos materiais e teores).

Quadro 1 – Traço base (TB-V) Quadro 2 – Traço base com pigmento (TP-V)

Cimento CPV-Ari	1,00	Cimento CPV-Ari	1,00
Areia	0,93	Areia	0,93
Brita	0,31	Brita	0,31
Pó de quartzo	0,2	Pó de quartzo	0,2
Sílica	0,15	Sílica	0,15
Superplastificante	0,03	Superplastificante	0,03
Cal	0,0	Cal	0,0
Pigmento	0,0	Pigmento	0,05
A/C	0,25	A/C	0,25

Fonte: O autor, 2023. Fonte: O autor, 2023.

Quadro 3 – Traço base com pigmento e cal (TPC-V) Quadro 4 – Traço base com CB (TB-B)

Cimento CPV-Ari	1,00	Cimento Branco	1,00
Areia	0,93	Areia	0,93
Brita	0,31	Brita	0,31
Pó de quartzo	0,2	Pó de quartzo	0,2
Sílica	0,15	Sílica	0,15
Superplastificante	0,03	Superplastificante	0,03
Cal	0,15	Cal	0,0
Pigmento	0,05	Pigmento	0,0
A/G	0,25	A/C	0,25

Fonte: O autor, 2023. Fonte: O autor, 2023.

Quadro 5 – Traço base com pigmento com CB (TP-B)

Cimento Branco	1,00	Cimento Branco	1,00
Areia	0,93	Areia	0,93
Brita	0,31	Brita	0,31
Pó de quartzo	0,2	Pó de quartzo	0,2
Sílica	0,15	Sílica	0,15
Superplastificante	0,03	Superplastificante	0,03
Cal	0,00	Cal	0,15
Pigmento	0,05	Pigmento	0,05
A/C	0,25	A/G	0,25

Fonte: O autor, 2023.

Quadro 6 – Traço base com CB pigmento e cal (CPC-B)

Cimento Branco	1,00	Cimento Branco	1,00
Areia	0,93	Areia	0,93
Brita	0,31	Brita	0,31
Pó de quartzo	0,2	Pó de quartzo	0,2
Sílica	0,15	Sílica	0,15
Superplastificante	0,03	Superplastificante	0,03
Cal	0,00	Cal	0,15
Pigmento	0,05	Pigmento	0,05
A/C	0,25	A/G	0,25

Fonte: O autor, 2023.

Mistura e Moldagem

Os materiais foram misturados em argamassadeira. Primeiramente, foram misturados todos os “secos”: cimento, areia, [a cal nos traços que a incluem], pó de quartzo, pigmento e a sílica, sendo misturados por 30 segundos, em velocidade baixa (140 rpm). Logo após, 75% da água foi adicionada, para se obter certa homogeneidade da mistura e formar uma pasta. Após 1 minuto o aditivo superplastificante foi diluído (nos 25% restante da água) e adicionado à mistura.

Após esta mistura, a velocidade do equipamento foi alterada para o modo rápido (285 rpm). O tempo total de mistura foi de aproximadamente 7 minutos.

Foram moldados Corpos de prova (CPs) cilíndricos, com dimensões de 50 mm x 100 mm, em um total de 4 (quatro) CPs para cada traço adotado na pesquisa. Os CPs foram desmoldados, após 24 horas, e submetidos à cura úmida (submersa em água, solução saturada de cal) até o dia de seus rompimentos, que se deu aos 28 dias.

A Figura 1 destaca os corpos de provas moldados nos moldes cilíndricos.

Figura 1 – Traços com CP-B recém moldados



Fonte: O autor, 2023.

Métodos

Neste estudo, analisou-se as propriedades de consistência, resistência à compressão e tonalidade dos microconcretos coloridos e de alto desempenho produzidos.

Pelo material ter uma característica mais próxima a de uma argamassa, foi submetido a ensaios especificados para esta. O microconcreto foi submetido aos ensaios de consistência (flow table), de acordo com a norma NBR 13276 (2002) e ao ensaio de resistência à compressão, de acordo com a NBR 5739 (1994).

A análise da tonalidade foi realizada através de uma comparação visual entre os CPs moldados, previamente ao ensaio de resistência à compressão.

Ensaio de consistência

O ensaio de consistência ocorreu conforme prevê a NBR 13276 (2002) -Determinação do índice de consistência normal da argamassa (Mesa de consistência manual).

O procedimento adotado seguiu as recomendações da norma. Após preparo da mistura (supracitado), esta foi utilizada para encher o molde tronco-cônico, colocado de modo centralizado sobre a mesa para índice de consistência. Enquanto um operador segurava o molde firmemente, outro o encheu em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, sendo aplicada

em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. A consistência foi medida a partir do diâmetro espalhado na mesa, sendo registradas 3 medidas de diâmetros, tomados em pares, de pontos igualmente distribuídos ao longo do perímetro. O mesmo procedimento foi repetido com cada traço realizado.

Resistência à compressão

Os corpos de prova tiveram suas superfícies retificadas para a realização do ensaio de resistência à compressão, no laboratório da empresa Polimix Concreto. O ensaio de compressão foi executado segundo a NBR 5739 (1994) (Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos). Foi adotada uma prensa de concreto hidráulica manual de 100 toneladas-força, com manômetro digital, dentro dos requisitos necessários para execução do ensaio.

Tratamentos de dados

Foi realizado um tratamento probabilístico utilizado para eliminar valores discrepantes e validar os resultados encontrados pelo ensaio de resistência à compressão. O método utilizado foi o do limite de desvio padrão (ou método do intervalo de tolerância), que consiste em estabelecer um limite mínimo e máximo aceitável dos resultados, este limite é definido pela soma da média com o desvio padrão (limite máximo) e pela subtração da média com o desvio padrão (limite mínimo).

O tratamento detalhado pode ser visualizado para cada traço nas tabelas a seguir.

Tabela 1 – Resistência para os CPs (TB-V)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	14,02	137,48012	70,14	70,14
2	10,99	107,76794	54,98	54,98
3	12,63	123,84978	63,19	63,19
4	16,78	164,54468	83,95	-
MÉDIA			68,07	62,77
Desvio Padrão			10,63	
Limites	Superior		82,94	
	Inferior		53,19	

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 2 – Resistência para os CPs (TP-V)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	16,07	157,5824	80,40	80,40
2	19,71	193,2763	98,61	-
3	14,86	145,7172	74,35	74,35
4	16,98	166,506	84,95	84,95
MÉDIA			84,58	79,90
Desvio Padrão			8,93	
Limites	Superior		97,08	
	Inferior		72,07	

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 3 – Resistência para os CPs (TPC-V)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	13,25	129,9295	66,29	66,29
2	14,6	143,1676	73,04	73,04
3	13,42	131,5965	67,14	67,14
4	15,04	147,4822	75,25	75,25
MÉDIA			70,43	70,43
Desvio Padrão			3,81	
Limites	Superior		75,76	
	Inferior		65,10	

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 4 – Resistência para os CPs (TB-B)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	14,91	146,20746	74,60	74,60
2	11,72	114,92632	58,64	-
3	16,06	157,48436	80,35	80,35
4	16,74	164,15244	83,75	83,75
MÉDIA			74,33	79,57
Desvio Padrão			9,64	
Limites	Superior		87,82	
	Inferior		60,84	

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 5 – Resistência para os CPs (TP-B)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	16,44	161,2106	82,25	82,25
2	12,52	122,7711	62,64	-
3	16,43	161,1126	82,20	82,20
4	16,69	163,6621	83,50	83,50
MÉDIA			77,65	82,65
Desvio Padrão			8,68	
Limites	Superior		89,80	
	Inferior		65,49	

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 6 – Resistência para os CPs (TPC-B)

CP	tf	kN	MPa	Correção
1	15,81	155,0329	79,10	-
2	12,46	122,1828	62,34	62,34
3	12,9	126,4974	64,54	64,54
4	14,31	140,3239	71,59	71,59
MÉDIA			69,39	66,16
Desvio Padrão			6,56	
Limites	Superior		78,58	
	Inferior		60,20	

Fonte: O autor, 2023.

Após esta eliminação dos valores discrepantes foi aplicada a equação da probabilidade para verificar qual a porcentagem de confiabilidade dos resultados adquiridos e propiciar uma análise individual segura para o resultado de cada traço. Deste artigo foram eliminados de 1 a 2 resultados por traço e obtida uma confiabilidade de 92%.

$$Fórmula = P(|x| < \sigma) \text{ (Equação 1)}$$

Onde x são os valores que se encontram entre o limite máximo e mínimo. A equação foi resolvida de forma computadorizada via planilha de Excel para garantir uma melhor confiabilidade do resultado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaio de consistência (Flow Table)

Os resultados da consistência encontram-se na Tabela 7, para os traços desenvolvidos com os cimentos: CP V.

Tabela 7 – Resultado Ensaio de Consistência (CP V)

Flow table - traço produzido com CP - V ARI RS (cm)	
TB-V	
	38,2
	38,7
	38,4
Média	38,4 cm
TP-V	
	34,4
	34,1
	34,6
Média	34,4 cm
TPC-V	
	27,8
	26,6
	27,1
Média	27,2 cm
Temperatura	26,1 °C
Umidade	89 %

Fonte: O autor, 2023.

Pela análise da consistência, observadas na Tabela 7, para os traços adotados com o CP V – ARI RS, notou-se que a incorporação de mais finos na mistura reduziu o seu espalhamento, sendo a introdução da cal o que tornou a mistura ainda mais coesa e com um menor espalhamento. Representando uma redução de 29,31% do espalhamento, em relação ao TB.

Diferentemente do que relatou o trabalho de Mendes, Souza e Barbosa (2019), onde foi verificada melhoria na trabalhabilidade, dado um aumento no abatimento no tronco do cone e uma maior facilidade no manuseio dos concretos com adição de cal em sua composição. Nota-se que o método de análise adotado (consistência pelo abatimento do tronco de cone), não foi o mesmo utilizado nesta pesquisa experimental, podendo ter influenciado no resultado.

Porém, sabe-se que quanto mais se adiciona finos à mistura, há uma maior coesão da pasta, o que propicia a redução deste espalhamento, estando este resultado coerente com o esperado.

Em relação aos traços rodados com o cimento branco CP B (Tabela 8), o mesmo comportamento quanto à consistência foi observado. Ou seja, ao se introduzir cal hidratada e pigmento ao sistema, observou-se uma maior redução no espalhamento, em relação ao traço padrão. Neste caso, esta redução foi de 37,24 %.

Tabela 8 – Resultado Ensaio de Consistência (CP B)

Flow table - traço produzido com CP - Branco (cm)	
TB-B	
	32,2
	31,6
	31,8
Média	31,9 cm
TP-B	
	23,2
	22,5
	22,1
Média	22,6 cm
TPC-B	
	20,1
	20,4
	19,5
Média	20,0 cm
Temperatura	28,2 °C
Umidade	81 %

Fonte: O autor, 2023.

Com relação aos cimentos adotados, nota-se que os traços produzidos com o Cimento Portland Branco apresentaram uma redução ainda maior no espalhamento do microconcreto na mesa da ABNT, sendo cerca 17,09% menor, em relação ao TB-V.

Nesse sentido, um fator que deve ser considerado é uma pequena diferença entre o CP B e o CP V RS, que é a limitação da concentração de Ferro Aluminato Tetracálcico (C_4AF) no CP B e um aumento no teor de Aluminato Tricálcico (C_3A), diferentemente do CP V RS, cuja a concentração do C_3A deve ser no máximo de 5%, em massa, como descrito por Mehta e Monteiro (1994).

Estas diferenças nas concentrações podem repercutir nas propriedades do cimento branco quando comparado ao cinza, tanto no estado fresco quanto no endurecido (KIRCHHEIM et al., 2003).

Essas diferenças de concentrações podem acarretar uma maior reatividade durante a mistura, nos instantes iniciais da hidratação, reduzindo a consistência nos concretos do TPC-V. A etringita, formada nos minutos iniciais da hidratação, repercute na perda da trabalhabilidade, assim como observado por Jakob et al. (2019). Como este cimento possui a maior quantidade da fase C_3A , esta interação pode ter sido propiciada.

Através dessas constatações e pelos resultados deste estudo, pode-se concluir que as misturas com o cimento branco proporcionaram uma mistura mais coesa e uma redução na trabalhabilidade do microconcreto, quando comparadas as misturas dosadas com o cimento do tipo CP V – ARI RS.

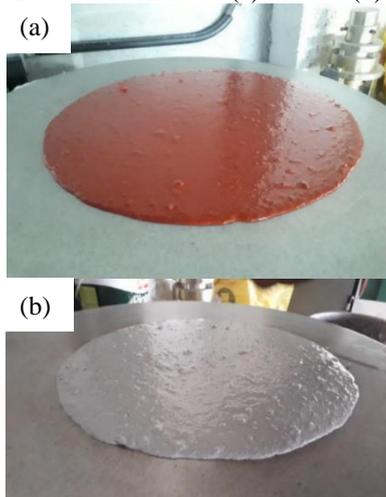
É importante observar também que, em todos os traços, a adição da cal e também do pigmento, reduziram a consistência dos microconcretos produzidos, ou seja, diminuíram seu espalhamento na flow table.

A introdução de materiais com granulometria mais fina ao sistema permitiu a maior coesão da mistura, repercutindo na consistência dos traços. Este fato se deve ao eventual aumento da área superficial total da mistura promovido pelo acréscimo de material fino à mesma.

Além deste fator, a cal possui a propriedade de propiciar uma maior retenção da água na mistura, como mencionado por Mendes, Souza e Barbosa (2019), além de ser um material aglomerante na pasta, o que pode justificar o comportamento apresentado.

As Figuras 2 a) e b), mostram os microconcretos espalhados na mesa da ABNT.

Figura 2 – Consistência do (a) TP-V e (b) TB-B



Fonte: O autor, 2023.

Quando a quantidade de água na mistura é maior do que a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento e este excesso de água na mistura começa a migrar para a superfície do concreto, temos a caracterização do fenômeno de exsudação.

Nos traços estudados, não foi visualizado exsudação da mistura. Esse resultado era esperado uma vez que, para montagem do traço de estudo foram analisados estudos publicados para identificar uma melhor composição para o concreto, com uma boa relação entre os componentes finos da mistura.

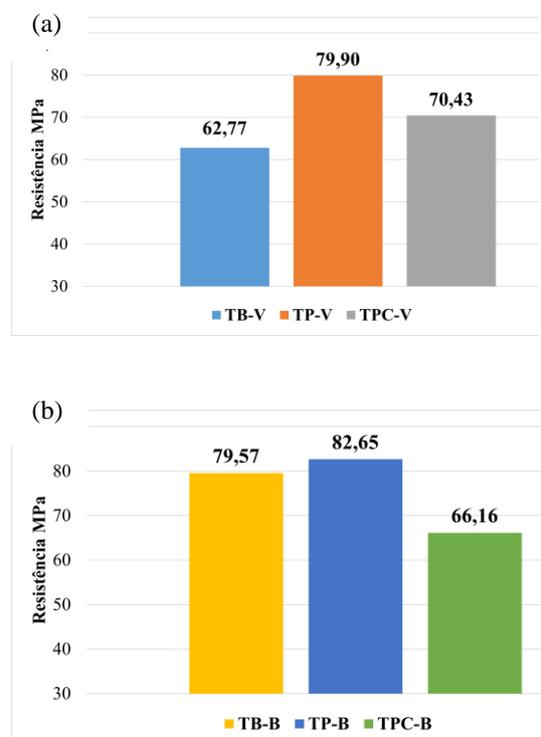
Um fator interessante é que a proporção do cimento é fator relevante nesse critério de exsudação, já que esses “finos atuam como uma barreira física, limitando a movimentação da água no concreto” (BARCAJI, 2018). No caso das misturas analisadas, além do cimento, a adição mineral, o pó calcáreo, o pigmento e a própria cal, também atuam na redução da exsudação dos microconcretos.

Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, as médias dos resultados tratados foram dispostas no Gráfico 2. Para os traços produzidos com o CPV

ARI RS e para os compostos por CP B, respectivamente.

Gráfico 2 - Resistência à compressão aos 28 dias (a) para traços com o cimento Portland V (CP-V) (b) para traços com o cimento Portland Branco (CP- B)



Fonte: O autor, 2023.

Analisando os valores apresentados acima, Gráfico 2 e na Tabela 9, a seguir, se percebe que o microconcreto produzido com adição de 5% de pigmento e sem a cal hidratada, apresentou o melhor desempenho, para ambos os tipos de cimento adotados.

Tabela 9 – Resultado Ensaio de Resistência à compressão para ambos cimentos adotados (CP V e CP B)

Traço	Resistência à compressão [MPa]
TB-V (base)	62,77
TP-V (base + pig.)	79,9
TPC-V (base + pig + cal)	70,43
TB-B (base)	79,57
TP-B (base + pig.)	82,65
TPC-B (base + pig + cal)	66,16

Fonte: O autor, 2023.

A adição do pimento, para ambas as misturas com os dois tipos de cimento, proporcionou um ganho de resistência. Sendo de 3,87% e 18,9%, para os microconcretos com CP B e CP V, respectivamente. Segundo Vieira e Molin (2011 apud Barboza et al. (2020), “quanto maior a densidade do material, maior será a resistência do mesmo”; provavelmente o pigmento, propiciou uma maior densidade ao conjunto, repercutindo em sua resistência mecânica.

Um outro efeito possível, propiciado pelo pigmento, é o efeito filler - físico, repercutindo na pasta pelo refinamento do tamanho dos poros e dos grãos, ajudando ao processo de hidratação dos grãos cimentícios. Uma análise da microestrutura da pasta, por técnicas de termogravimetria e ensaio de Difração de Raios-X (DRX), poderá verificar essa hipótese.

Novos estudos, contemplando as mesmas análises, mas em um tempo maior, cerca de 91 dias, são desejáveis para se verificar as reações pozolânicas ao longo do tempo.

Com relação a introdução da cal às misturas, pode-se verificar através da Tabela 9 que, a introdução da cal hidratada ao TP-V, promoveu um ganho de resistência de 12,2%. Acredita-se que a disponibilidade do hidróxido de cálcio foi propiciada tanto pelo meio mais alcalino da solução, quanto pela superfície específica deste cimento.

Quando utilizado CP B, cal e pigmento (TPC-B), a resistência à compressão do microconcreto foi inferior, em cerca de 16,85%, em relação ao TB-B.

Este último resultado corrobora com o que Holland, Nichols e Nichols (2012) constataram em seu estudo, onde a resistência média à compressão de uma mistura de concreto à base de cimento Portland (CP I) com adição de cal, também em substituição ao cimento, caiu com certa proporcionalidade, em

comparação a mistura base (sem a cal) a medida em que se adicionava a cal. Esta perda aumenta ao passo que se adiciona a quantidade de cal, adições de 42,9% de cal geraram até 60% de perda na resistência (HOLLAND; NICHOLS; NICHOLS, 2012).

Os dados obtidos para os microconcretos produzidos com CP B não seguiram a mesma tendência que os microconcretos produzidos com o cimento CP V, desta forma percebe-se que nem todos os tipos de cimento propiciam a maior interação com a cal, repercutindo positivamente no ganho de resistência.

Análise da coloração

A influência dos tipos de cimento e da introdução da cal e do pigmento, em relação à coloração, foi verificada aos 28 dias de idade. A análise visual foi feita nas mesmas condições de luminosidade para evitar disparidade nos resultados.

Como esperado, o microconcreto produzido com Cimento Portland Branco obteve cores mais nítidas, possivelmente pela melhor interação (ainda enquanto seco) dos grãos brancos do cimento com o pigmento.

A Figura 4 mostra os corpos de prova da mistura com CP B e pigmento.

Figura 4 – Corpo de prova do TP-B



Fonte: O autor, 2023.

CONCLUSÃO

O estudo realizado analisou a influência da cal hidratada e do pigmento em microconcretos coloridos de alta resistência. Para todos os traços, o microconcreto adquiriu resistência características para um microconcreto de alta resistência, ou seja, acima de 50 MPa.

Em relação as propriedades do microconcreto, no estado fresco, observaram-se a ganho da consistência ao se incorporar o pigmento e a cal nas misturas.

A introdução do pigmento, no teor de 5%, em relação à massa do cimento, propiciou um incremento na resistência à compressão em todos os microconcretos analisados.

O microconcreto com cimento CP V e pigmento apresentou um ganho de resistência à compressão de 27,29% (17,13 MPa), em relação ao microconcreto do traço padrão, sem o pigmento.

Nos microconcretos dosados com o cimento CP B, um resultado semelhante foi observado, sendo medido um acréscimo de 4,09%, da resistência à compressão, em relação ao microconcreto padrão.

Já a adição da cal ao microconcreto com o cimento CP V houve um acréscimo de 12,20% (7,66 MPa), na resistência à compressão, em relação ao traço padrão e uma redução em relação ao traço com o pigmento.

No caso dos microconcretos dosados com cimento CP B, cal e pigmento, houve uma redução de 16,85% (13,41 MPa), da resistência à compressão, em relação ao traço padrão. Também houve uma redução em relação ao traço com o cimento e o pigmento apenas.

Provavelmente o tipo de cimento influencia o desenvolvimento da resistência quando introduzido cal na mistura. Os grãos mais finos do CP V

ARI, pode ser um fator intensificador desta interação.

Em relação à tonalidade o microconcreto produzido com Cimento Portland Branco obteve cores mais nítidas, o que pode ser explicado pela melhor interação (ainda enquanto seco) dos grãos brancos do cimento com o pigmento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro. 2003.

BARBOZA, Lucas da S., et al. Análise mecânica da influência de adição de pigmentos em concreto autoadensável de cimento Portland Branco Estrutural. **Revista de Engenharia e Tecnologia** ISSN 2176-7270. v. 12, nº. 2, Jun,2020.

BARCAJI, Edgar, et al. Microconcreto auto adensável com incorporação de adições minerais. Avaliações no estado fresco. **CLB-MCS 2018**. 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis. Coimbra, 14-16 de fevereiro de 2018.

- BARRAL, Thiago. **Os tipos de cimento e os critérios de escolha**. Internet Archive WayBack Machine (Biblioteca Digital), 2007. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20070707054632/http://www.projetocad.ufjf.br/texto02.htm>. Acesso em: 3 set. 2022.
- DHANESH, E.; SHANMUGASUNDARAM, M. Prospective utilisation of hydrated lime as a performance enhancer in concrete. **Materials Science and Technology**. Publicado online: 21 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2188671>. Acesso em: 10 abr. 2023.
- HOLLAND, Nancy L.; NICHOLS, Anne B.; NICHOLS, John M. The use of hydrated lime in concrete as a cement replacement: effect on compressive strength. **American Society for Testing and Materials**, 2012. Disponível em: <https://www.astm.org/stp104459.html>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- JAKOB, Cordula, et al. Relating Ettringite Formation and Rheological Changes during the Initial Cement Hydration: A Comparative Study Applying XRD Analysis, Rheological Measurements and Modeling. **Materials**, 12 set. 2019. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/18/2957>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/335778491>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Proposta de modelagem da carbonatação de concretos de cimento portland branco. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 3, n. 3, p. 95-109. Porto Alegre, RS, 2003.
- KULAKOWSKI, Marlova Piva. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostas com adição de sílica ativa**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3594/000390188.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 mar. 2023.
- PASSUELO, Alexandra. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e comportamento mecânico de concretos a base de cimento branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5845/000432419.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 mar. 2023.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. **Concreto**: estruturas, propriedades e materiais. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 1994.
- MENDES, Yasmin G. B; SOUZA, Jakeliny M. e BARBOSA, Isa L. da Silva. Influência da cal hidratada na massa do concreto convencional. **Revista ETIS**. v.1. 2019. Disponível em: <http://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/etis/article/view/3106/2527>. Acesso em: 3 set. 2022.
- SHARMA, Nittin; SINGH, Khushpreet. Influence of glass powder and hydrated lime on strength properties of concrete. AIP Conference Proceedings, 3 feb. 2023. [Anais]. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0130714>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2558/1/020021/2874021/Influe>

nce-of-glass-powder-and-hydrated-lime-on?redirectedFrom=fulltext.
Acesso em: 10 abr. 2023.

SILVEIRA, Rodrigo G. da. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concreto com alto**

teores de cinza volante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.