

DETERMINAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA ESTUDO LABORATORIAL DE CONCRETOS ESPECIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA

João Victor da Cunha Oliveira ¹; Miriam de Normando Lira ²; Kennedy Flávio Meira de Lucena ³; Leila Soares Viegas Barreto Chagas ⁴; Frankslale Fabian Diniz de Andrade Meira ⁵

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), joaovictorwo@gmail.com;

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), miriamnormando1@hotmail.com;

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), kennedy.lucena@ifpb.edu.br;

⁴ Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertão-PE), leila_viegas@hotmail.com;

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), frankslale.meira@ifpb.edu.br

Resumo: Dentre os variados avanços no âmbito da construção civil, os materiais de construção ponderam de forma qualitativa o potencial dos elementos construtivos quanto ao desempenho físico-mecânico e durabilidade, fatores que merecem fundamental atenção durante a sua execução para favorecerem o aumento da vida útil das construções em geral. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo quantificar o estudo laboratorial para concretos especiais, com ênfase no desenvolvimento de formulações que preconizam resistências à compressão axial elevadas. Foram definidas 10 composições, em massa, para fabricação dos concretos, aplicando cimento CP-V ARI, areia, metacaulim, microssílica, aditivo superplastificante e água de amassamento com temperatura entre 1 e 3 °C. Os materiais sólidos foram misturados a seco, com o auxílio de saco plástico, enquanto a água e o aditivo foram misturados para comporem um único líquido, onde seguiram para o misturador planetário. Após a conformação dos moldes cilíndricos de dimensões 5x10cm com auxílio de vibrador de imersão portátil, os moldes foram desformados e receberam tratamento térmico mediante dois períodos de pré-cura e dois tempos de isoterma de acordo com o traço definido, com submissão ao teste de compressão axial em idades de 7 e 14 dias. Diante de todas as variações dos traços, observou-se que o fator água/cimento quando reduzido, aumentava a resistência, da mesma forma que os períodos usados para os dois tratamentos térmicos não produziram resistências com relevantes diferenças.

Palavras-Chave: Formulações, Concretos especiais, Aditivos, Adições minerais, Alto desempenho.

INTRODUÇÃO

Diante dos avanços tecnológicos que o setor da construção civil está imerso, estão sendo cada vez mais palatadas medidas que possam melhorar e trazer benefícios para as aplicações técnicas desenvolvidas em cada caso especificado, com soluções plausíveis partindo das necessidades surgidas na prática.

Seitenfuss *et al.* (2014) destacam que a classe de concretos de alto desempenho (CAD) é composta pelo uso em grande escala de produtos com característica cimentícia aliada ao baixo fator água cimento (a/c) adotado na mistura, além do cuidado quanto ao controle de qualidade dos materiais usados e respectiva aplicação em construções específicas. Esse enfoque busca configurar propriedades próximas as rochas, todavia com a vantagem de ser moldável (BIZ, 2001).

Os concretos que possuem um caráter mais rigoroso no que concerne o seu controle tecnológico, desde a caracterização dos materiais envolvidos, até a fabricação de um compósito com propriedades até 8 vezes mais potentes que os concretos convencionais, demanda mão de obra

altamente especializada, além de equipamentos de ponta com estrutura favorável ao desenvolvimento dos produtos para testes em escala com amostragem real.

Em uma classe mais elevada de resistência e durabilidade, o concreto de pós reativos (CPR) foi criado por Richard & Cheyrezy (1995), classificado entre os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) a base de cimento Portland que detém as melhores propriedades físico mecânicas já patenteadas até hoje, utilizado nas mesmas aplicações do concreto convencional ou como tecnologia auxiliar.

Através da eliminação dos agregados graúdos na mistura, a tortuosidade da rede porosa é melhorada através do refinamento efetivo, com zona de transição inexistindo entre agregado e a pasta de cimento Portland, onde Tutikian *et al.* (2011) afirmam aumentar a superfície do esqueleto granular, proscurendo os vazios internos ou poros aderidos à superfície do agregado.

As adições minerais que envolvem a efetiva atuação dos concretos especiais de classe CAD e CUAD proporcionam a melhoria das propriedades no estado fresco e endurecido, como melhor maleabilidade, auto-adensamento, melhor compacidade, aumento relevante da resistência à compressão axial e durabilidade. Por dotarem de características pozolânicas, ou seja, produzirem compostos de hidratação secundários (C-S-H), como o cimento, quando na presença de hidróxido de cálcio (produto de hidratação do cimento), “[...] preenchem os vazios grandes, refinam a estrutura dos poros e [...] conseqüentemente, a permeabilidade do sistema é reduzida e há um aumento na resistência mecânica e na durabilidade do concreto” (PERIM, 2013).

É palatável que mesmo em grande parte dos trabalhos que envolvem materiais de alta resistência à base de cimento Portland discorra-se da aplicação de apenas 1 adição mineral, dando ênfase para a microssílica, outros autores propõem a ação de 2 adições com ação sinérgica, como a adição de nanossílica e microssílica adotada por Mallmann (2013), que buscou averiguar as propriedades de CPR isento de areia e com extensa cura térmica, e Rigo (2016), estudando argamassas para aplicação em concretos com foco em melhorias no desempenho mecânico. Neste estudo, optou-se pelo uso do metacaulim pela semelhança granulométrica em relação ao pó de quartzo, componente do CPR, e pelo favorecimento da reação em cadeia junto da microssílica.

A partir do que foi exposto, este trabalho tem por objeto desenvolver o estudo de concretos especiais que margeiem resistências à compressão axial próximas das classificações de CAD e CUAD, desenvolvendo metodologia experimental com 10 traços e seus respectivos procedimentos de adensamento e cura térmica, verificando a melhor composição perante o melhor método de fabricação.

METODOLOGIA

Para o concreto de pós reativos, Vanderlei (2004) desenvolveu o programa experimental referenciado em estudos desenvolvidos no Canadá e na França, concernindo na criação do traço utilizado em sua tese (Tabela 1):

Tabela 1 – Formulação utilizada como respaldo para os novos traços desenvolvidos

Material	Relação em Massa (kg)	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1	874
Areia	1,101	962
Pó de Quartzo	0,235	205
Sílica Ativa	0,246	215
Superplastificante (3%)	0,030	26
Água (a/c = 0,18)	0,180	157

Fonte: Vanderlei (2004)

Mediante diversos fatores, houve em primeira instância o desafio para substituição do pó de quartzo por outro material que não trouxesse alterações para os resultados de rompimento aos 7 dias de idade, da mesma forma que detivesse a granulometria semelhante do mesmo (#325 mesh) propiciando o empacotamento das partículas igual o pó de quartzo. Como solução, foi adotado como substituto o metacaulim, que atendeu às premissas iniciais. Os traços utilizados para os testes estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Traços definidos para estudo de concretos especiais

Traço – 1 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,040	0,267	0,287	0,035	0,505
Traço – 2 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,040	0,267	0,287	0,0875	0,435
Traço – 3 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,314

Traço – 4 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,157	0,197	0,115	0,314
Traço – 5 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,175	0,195	0,115	0,244
Traço – 6 (Cura 1 + Vibração 1) *					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,266
Traço – 7 (Cura 2 + Vibração 2) **					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,314
Traço – 8 (Cura 2 + Vibração 2) **					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,290
Traço – 9 (Cura 2 + Vibração 2) **					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,266
Traço – 10 (Cura 2 + Vibração 2) **					
Cimento	Areia	Metacaulim	Microssílica	Aditivo SP	a/c
1	1,050	0,177	0,197	0,120	0,244

Fonte: Autores (2018)

Conforme os traços, separou-se os seis primeiros para condições distintas de adensamento e cura, e os quatro posteriores foram fabricados dando ênfase ao melhorados nessas etapas. Na condição de Cura 1, o tempo de pré-cura adotado foi de 72 horas, com isoterma de 16 horas à temperatura de 75 °C, e tempo total de aquecimento de 20 horas (4 horas do aumento da temperatura + 16 horas de isoterma), e Vibração 1, que consistiu em dividir em 2 camadas com 30 segundos de vibração. Na condição de Cura 2, o tempo de pré-cura adotado foi de 32 horas, com isoterma de 24 horas à temperatura de 65 °C, e tempo total de aquecimento de 28 horas (4 horas do

aumento da temperatura e 24 horas de isoterma), e Vibração 2, que consistiu em dividir em 3 camadas com 30 segundos de vibração. Depois dos tratamentos, os moldes foram retirados dos béqueres e aguardaram mais 4 horas até o resfriamento total da água, e armazenados em tanque até atingirem as idades de 7 e 14 dias para realização dos rompimentos.

Todos os traços testados foram fabricados mediante o uso de argamassadeira adaptada (batedeira planetária) seguindo as seguintes etapas: misturou-se com o auxílio de saco plástico os materiais secos (cimento, areia, microssílica e metacaulim) e em paralelo com o auxílio de proveta e béquer, mediu-se a massa de água (com temperatura entre 1 e 3 °C), e aditivo superplastificante e misturou-se em um único líquido, para possibilitar melhor homogeneização quando colocados na argamassadeira.

Adicionou-se metade do material seco e aos poucos, colocou-se o líquido para iniciar o processo de homogeneização, que requer bastante cuidado e rapidez pela alta reatividade dos materiais. Logo após boa parte do líquido ser adicionado à metade do material seco, submeteu-se à argamassadeira para conferir melhor eficácia na mistura, adicionando-se aos poucos o material seco intercalado com o líquido, até finalizar todo o material, durando cerca de 15 minutos todo o processo.

Posterior à adição de todo o líquido, concreto permaneceu em processo de mistura por aproximadamente 5 minutos, para então ser conformado nos moldes cilíndricos de dimensão 5x10cm. O fato de se usar moldes dessa dimensão configura-se pela redução do consumo de matérias-primas e pelo rendimento ser mais elevado do que o convencional molde de 10x20cm. A granulometria da areia sofreu modificação, uma vez que na região onde desenvolve-se o estudo além de não existir areia com mesma composição granulométrica, a que foi adotada por Vanderlei (2004) não foi seguida como um padrão para ser apenas repetida, e sim como base para serem realizadas as modificações pertinentes para este estudo.

A etapa de conformação foi estabelecida pela confecção dos corpos de prova através de vibração com vibrador portátil de imersão, usando de forma a proporcionar o melhor adensamento da mistura e minimização dos poros existentes na superfície interna da fôrma cilíndrica, mesmo que o concreto detenha aditivo superplastificante, que favoreça o fenômeno de auto adensamento.

Após a conformação, os moldes foram cobertos por plástico filme e reservados até serem desformados com 24 horas, ficando imersos nos béqueres à 25 °C, até serem direcionados para o processo de cura térmica em estufa elétrica SOLAB Modelo SL-100 com potência de 3.000 W e circulação de ar forçada, com uso de béqueres. Vale ressaltar que a água não evaporou ao ponto de

deixar os protótipos não submersos totalmente ao final do tempo cronometrado, sendo tomado esse cuidado com testes preliminares para verificar o nível da água após o procedimento oficial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante as primeiras composições criadas, na Tabela 3 abaixo, expõe-se as médias dos resultados de resistência à compressão axial para as idades de 7 e 14 dias. O Gráfico 1 denota o comportamento dos traços quanto às resistências mediante a idade de rompimento, obtendo-se um parâmetro global de como se comportaram os traços idealizados para o início deste estudo laboratorial com determinação de formulações de concretos especiais.

Tabela 3 – Resistência à compressão axial de concretos especiais

Traços	Idades	
	7 dias	14 dias
T-1 *	80,052 MPa	79,777 MPa
T-2 *	103,638 MPa	98,691 MPa
T-3 *	112,782 MPa	118,529 MPa
T-4 *	108,435 MPa	109,218 MPa
T-5 *	126,524 MPa	129,198 MPa
T-6 *	118,904 MPa	115,656 MPa
T-7 **	80,318 MPa	81,751 MPa
T-8 **	99,74 MPa	116,93 MPa
T-9 **	116,181 MPa	119,204 MPa
T-10 **	111,25 MPa	126,575 MPa

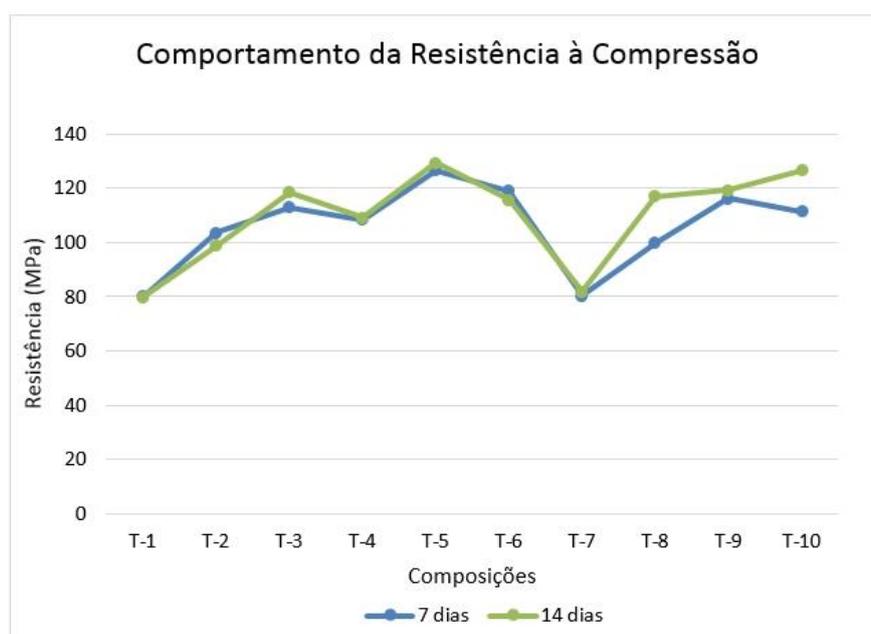
Fonte: Autores (2018)

É notável que para todos os testes realizados, as resistências obtidas alcançaram valores relativamente razoáveis, interpretando que as formulações criadas para este concreto especial margeiam resistências entre o concreto de alto desempenho, e o concreto de ultra alto desempenho (CAD e CUAD).

Comparando os resultados obtidos com o concreto de pós reativos desenvolvido por Vanderlei (2004), observou-se que para a idade de 7 dias, 6 dos 10 traços desenvolvidos superaram a marca alcançada pelo autor de 105,65 MPa em um traço de referência sem a adição de fibras

metálicas. Em contrapartida, os resultados aos 14 dias para todos os traços não obtiveram progressões superiores à 10% da resistência, chegando em um limite máximo de quase 130 MPa para o melhor traço, sendo que o autor alcançou a marca de aproximadamente 160 MPa. Notou-se que essa não progressão esteja associada ao alto teor das adições minerais (metacaulim e microssílica) em relação ao cimento, impossibilitando o aumento em idades mais avançadas das resistências à compressão, independente do modo de adensamento e tipo de cura térmica adotada.

Gráfico 1 – Curvas características das idades de rompimento



Fonte: Autores (2018)

As adições minerais também possuem uma ação de fundamental importância para que se possa alcançar progressões mais relevantes, e uma provável modificação nos quantitativos das adições podem acarretar melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão axial.

O fator água/cimento (a/c) que sofreu algumas modificações conforme o tipo de cura e vibração, e também mediante a quantidade das adições que se era utilizada, ocasionou melhores resultados para os dois menores valores utilizados (traços T-5 e T-10). O que distingue o traço T-5 do traço T-10 é justamente a diferença ínfima dos quantitativos das adições minerais e aditivo: o T-5 possui 0,02 da sua relação em massa menor que o traço T-10 para o metacaulim e microssílica, e o aditivo superplastificante a diferença é ainda maior: 0,05.

Essa pequena diferença exemplifica o potencial de aumento do desempenho mecânico, cabendo ao compósito produzir melhor reação de hidratação para que os poros tornem-se cada vez mais densos, minimizando a quantidade de defeitos e produzindo uma matriz melhor empacotada,

reduzindo o custo energético com tempos excessivos de cura térmica e melhor equilíbrio no que se refere à redução no uso dos materiais aplicados na fabricação dos concretos. Assim, o traço T-5 é o melhor desenvolvido dentro da metodologia que abarca as classes de concretos especiais envolvidas nesse trabalho, evidenciando os melhores resultados nas marcas de 7 e 14 dias.

CONCLUSÕES

Através dos testes laboratoriais, onde versou-se adotar metodologias semelhantes ao concreto de pós reativos para fabricação de concretos especiais com mais de uma adição mineral aderidas de potencial pozolânico, conclui-se que as faixas adotadas de resistência à compressão axial corroboram o aperfeiçoamento nos quantitativos dos traços, pondo em evidência o metacaulim, a microsilica e o aditivo superplastificante, grandes aliados não obtenção de performances de ultra alto desempenho em compósitos de matriz cimentícia quando dosados de maneira coerente.

A metodologia empregada para o adensamento e cura térmica garantem com que o melhor traço desenvolvido promova melhores comportamentos mecânicos sem a modificação drástica no tempo de adensamento (aumento da quantidade de camadas), ou no tempo de isoterma e a respectiva temperatura (elevação do tempo de residência em estufa). O fator a/c denota bom rendimento ao material para os 10 traços testados, requerendo uma modificação quando o aditivo superplastificante for modificado na mistura, e a temperatura de uso da água (entre 1 e 3 °C) mantem-se adequada para aplicação em testes posteriores com melhoramento das adições ao concreto especial estudado.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa, ao IFPB – Campus Campina Grande pela estrutura laboratorial, e às empresas: Elizabeth Cimentos, BASF S.A., Tecnosil, e Maia Macedo pelas doações das matérias-primas para realização do estudo.

REFERÊNCIAS

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MALLMANN, P. F. **Concreto de pós reativos: adição de nanosílica.** 69 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada.** 216 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).

RIGO, L. A. **Estudo da sinergia entre nano sílica e micro sílica em argamassas para aplicação em concretos como proposta de melhoria de desempenho.** 83 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

SEITENFUSS, A. B.; LIMA, M. S.; SILVA, A. W. **Estudo de dosagem de concreto de alto desempenho.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – 21º CBECIMAT. *Anais...* Cuiabá-MT, Brasil, 2014. Disponível em <<https://goo.gl/AxHztD>>.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo-SP: IBRACON, 2011, p. 1238-1325, v. 2.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** 168 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.