

Dosagem experimental de concreto de pós-reativos utilizando diferentes métodos de empacotamento de partículas

Experimental dosage of post-reactive concrete by using different methods of particle packing



Thais Isabela Simão Kardec

Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM).
e-mail: thaiskardec@unipam.edu.br

Mateus Felipe da Silva

Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM).
e-mail: mateussilvaengenharia@outlook.com

Jessé Moreira de Oliveira

Doutor em Físico-Química Teórica; Docente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). e-mail: emaildojessomoreiraoliveira@gmail.com

Douglas Ribeiro Oliveira

Professor do Engenharia Civil do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM).
e-mail: douglasro@unipam.edu.br

RESUMO: O concreto de pós-reativos (CPR) pode ser entendido como um concreto de alta durabilidade, baixa permeabilidade e de elevada resistência. Apresenta em sua composição cimento, agregados de diâmetro máximo de 2 mm, baixo fator água/cimento (a/c), aditivos hiperplastificantes de 3ª geração e adições como sílica ativa e fibras metálicas. No presente trabalho foram avaliados métodos de dosagens por empacotamento de partículas, sendo analisados três métodos: Fuller, Andreasen e Andreasen modificado, variando os coeficientes de empacotamento, sendo concluído que o coeficiente de empacotamento 0,25 aplicado ao método de Andreasen foi o mais eficiente no quesito resistência mecânica. Definuiu-se a porcentagem ideal de 5% de aditivo, das proporções de pozolanas, utilizou-se uma substituição de 25% de adições nas quais 5% de metacaulim e 20% de sílica, e a cura por confinamento a 110°C. Ao fim dos ensaios, foram obtidos aos 7 dias 179 MPa de resistência à compressão e 21,21MPa à flexão.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto de pós-reativos. Empacotamento de partículas. Adições minerais. Processos de cura.

ABSTRACT: Post-reactive concrete (PRC) can be understood as a high-durability, low-permeability, high-strength concrete. In its composition are present cement, aggregates of

maximum diameter of 2 mm, low water / cement factor (a/c), hyperplasticizing additives of 3rd generation and additions as active silica and metallic fibers. In the present work, we evaluated particle packing dosage methods, and analyzed three methods: Fuller, Andreasen and Andreasen modified, varying the packaging coefficients. It was concluded that the 0.25 packaging coefficient applied to the Andreasen method was the most efficient in mechanical resistance. The ideal percentage of 5% additive, from pozzolan proportions, was used a 25% substitution of additions in which 5% of metacaulin and 20% silica, and curing by confinement at 110 ° C. At the end of the tests 179 MPa of compressive strength and 21.21 MPa at flexion were obtained at 7 days.

KEYWORDS: Post-reactive concrete. Particle packing. Mineral additions. Cure processes.

1. INTRODUÇÃO

O concreto de alta resistência, ou o concreto de pós-reativos (CPR), pode ser entendido como um concreto de alta durabilidade, baixa permeabilidade e também de alta resistência. Trata-se de um concreto que apresenta em sua composição cimento de alta resistência inicial, agregados de boa qualidade com diâmetro máximo de 2 mm, baixa relação água/cimento (a/c), aditivos superplastificantes e adições como sílica ativa e fibras metálicas (NEVILLE, 2013).

O material oferece grandes resistências à compressão e também à tração e à flexão, quando adicionadas fibras metálicas na sua composição (DIAS; GIONGO, 2006). De acordo com Bina (1999), quanto às características macroscópicas, o CPR apresenta um meio quase impermeável tanto à água quanto a agentes agressivos. Apresenta alta resistência ao gelo/degelo e baixíssima retração. A utilização deste concreto é usual em estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, passarelas, pré-fabricados de túneis, além de projéteis e engrenagens.

Um dos principais problemas envolvendo o CPR está na metodologia de dosagem e na obtenção de agregados com qualidade para ser empregado em sua produção. Por se tratar de um concreto de alta resistência, é necessária a utilização de métodos de dosagem diferentes do concreto convencional. Quanto aos agregados, são utilizados a areia de quartzo e o pó de quartzo, o qual pode ser de difícil obtenção ou até mesmo de elevado custo em determinadas regiões.

A maior dificuldade na execução desse tipo de concreto em obras está na obtenção de materiais específicos e no controle tecnológico da dosagem, além da necessidade da análise laboratorial mais precisa dos componentes do concreto. Por se tratar de um concreto com apenas finos, o trabalho de pesquisa a ser apresentado irá avaliar métodos de dosagens matemáticas baseados na análise do empacotamento de partículas, sendo analisados três métodos: Fuller e Thompson, Andreasen e Andersen; e Andreasen modificado por Alfred. Tais métodos são equações exponenciais teóricas que definem a distribuição de partículas esféricas de forma a tornar contínua a composição granulométrica das misturas, resultando na menor porosidade do sistema. O expoente é chamado coeficiente de distribuição (q) e quão menor seu valor, maior finura terá a curva granulométrica idealizada.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente estudo é efetuar dosagem experimental de concreto de pós reativos de alto desempenho através de diferentes métodos de dosagem por empacotamento de partículas. Para tanto, conta com os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Analisar a influência de altas dosagens de hiperplastificantes na trabalhabilidade e resistência mecânica nos concretos de pós-reativos para definição do aditivo ideal e seu teor ótimo.
- ✓ Determinar a mistura de pozolanas com maior reatividade e contribuição ao desempenho mecânico dos concretos.
- ✓ Comparar três métodos de dosagem por empacotamento granulométrico com diferentes coeficientes de distribuição (coeficiente q), a fim de se obter a matriz cimentícia mais resistente.
- ✓ Verificar a influência de diferentes processos de cura na resistência mecânica da matriz escolhida.
- ✓ Analisar a influência da utilização de fibras de aço na trabalhabilidade e na resistência mecânica do concreto.

3. JUSTIFICATIVA

O concreto de ultra alto desempenho apresenta características que possibilitam a execução de estruturas mais complexas, além de reduzir dimensões dos elementos estruturais, a quantidade de aço e o número de vigas, reduzindo o custo final da construção. Os estudos têm se concentrado em aplicações industriais, em fabricação de peças resistentes a impactos com grande ductilidade, em aumento da durabilidade das construções e menor peso das peças pré-moldadas para estruturas especiais, etc.

Todos os modelos de dosagem por empacotamento de partículas, entretanto, consideram as partículas como sendo esferas de diferentes tamanhos, e a não observância desse princípio dos pós e materiais reais acaba por criar incertezas quando ao desempenho do empacotamento, fazendo necessários testes com diferentes valores de q .

Não há uma padronização nem um consenso entre os estudos quanto ao método e o valor de coeficiente de distribuição ideal. Autores como Vanderlei e Giongo (2006) desenvolveram dosagem pelo método proposto por Andreasen e Andersen, o qual apresenta um modelo matemático de natureza semi-empírica, variando os coeficientes de distribuição de 0,20 a 0,37.

Da mesma forma, não há estudos que procuram relacionar a influência dos aditivos, da cura térmica, adições de fibras e blendas com diferentes materiais pozolânicos na elaboração de um processo de dosagem para concretos de pós-reativos.

Portanto, justifica-se este estudo como forma de auxiliar o meio acadêmico

a definir o melhor método para majoração da resistência, haja vista o grande número de trabalhos que defendem diferentes fórmulas, métodos, coeficientes e diferentes adições.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. CONCRETO DE PÓS-REATIVOS

O CPR é um concreto que apresenta elevada resistência à compressão, variando entre 200 MPa até 800 MPa, fator de grande interesse na construção civil atual, o qual exige concretos com maiores capacidades mecânicas e físicas que possibilitam a criação de estruturas mais esbeltas e diferenciadas com elementos estruturais ou decorativos mais complexos (BINA, 1999).

Os concretos de ultra alto desempenho são caracterizados por apresentarem um baixo teor água/cimento e serem constituídos de agregados miúdos com diâmetros menores que 2 mm, fibras de aço, adições minerais e cimentos com altas resistências iniciais. Da mesma forma, necessitam de um processo de fabricação, moldagem e cura especiais para que possam atingir o máximo desempenho.

4.2. MÉTODOS DE DOSAGEM E MATERIAIS

Os métodos de dosagem por empacotamento de partículas partem de modelos matemáticos em que são considerados os tamanhos das partículas e um coeficiente de distribuição. O processo de empacotamento consiste no cálculo proporcional de agregados com diferentes granulometrias, determinando qual massa de cada agregado deverá ser utilizada na dosagem para que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas partículas maiores, minimizando assim a quantidade de vazios.

O modelo de empacotamento de Fuller e Thompson propõe formulação matemática que resulta em uma composição granulométrica de distribuição contínua. “Para isso estabeleceram um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,5 para otimizar a mistura e obter uma curva com o mínimo de vazios” (LONDERO, 2016, p. 16).

Diversas adaptações ao método foram propostas de modo a melhorar o desempenho mecânico dos compostos, como cerâmicas, concretos, argamassas com maior foco na mudança do coeficiente q . Pesquisadores como Andreasen e Andersen almejavam substituir o coeficiente de distribuição por valores que variam entre 0,33 e 0,50. O modelo de Andreasen considera uma distribuição real onde todos os tamanhos das partículas podem ser considerados. Outro método utilizado é o método de Furnas, que considera as partículas individualmente, sendo caracterizadas pelo seu diâmetro, volume e densidade.

Funk e Dinger (1994) verificaram que os modelos de Furnas e Andreasen convergem para uma única equação e, por meio de simulações computacionais,

eles demonstraram a influência do coeficiente de distribuição, confirmando que se o valor q for 0,37 ou menor, será possível obter uma distribuição infinita sem porosidade. Caso contrário, existe sempre porosidade. Esse modelo foi chamado de Modelo de Andreasen Modificado.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), a seleção dos materiais exerce uma grande influência em qualquer composição de concreto, mas quando se trata de concretos de ultra alto desempenho, essa questão se torna primordial.

Para composição da dosagem final do CPR, é utilizado normalmente cimento CPV ARI, por este apresentar uma alta pureza, um módulo de finura elevado e por ter como principal característica uma alta resistência inicial. Com a aplicação desse material, encontra-se uma estrutura eficaz e grandes vantagens pela sua durabilidade e resistência.

Os agregados utilizados no CPR devem apresentar dimensões reduzidas e controladas, auxiliando no empacotamento, na compacidade e na homogeneidade. Desta forma, é comumente visto em dosagens de concretos de pós-reativos o uso de agregados de origem quartzosa.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) ressaltam que os agregados de quartzo são recomendados devido às propriedades superiores da rocha mãe. O quartzo é uma rocha de elevada dureza e resistente à compressão, superior à maioria dos materiais disponíveis para britagem.

Os aditivos químicos com maior desempenho permitem a dosagem de concretos de elevadas resistências e com baixos teores de água/cimento, mantendo a consistência necessária para uma boa aplicação e trabalhabilidade do concreto. Dentre os diversos tipos de aditivos que proporcionam características que melhoram desempenho, existem os aditivos superplastificantes e hiperplastificantes.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), as adições minerais são componentes de grande importância para os concretos de alto desempenho, devido a suas ações químicas e físicas. As adições com atividades pozolânicas mais comumente usadas para o desenvolvimento são a sílica ativa, o metacaulim e as cinzas de casca de arroz, isso devido à característica em comum dessas adições, por possuírem grãos de pequena dimensão com grande potencial pozolânico.

Há diferentes processos de cura, os quais agem de maneira específica para cada tipo de concreto. Nos CPR, é comumente utilizada a cura sob pressão e em altas temperaturas. Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), a cura térmica colabora com a formação de cristais que influenciam a resistência mecânica no concreto.

Outro componente da mistura também sofre mudanças quando colocado sobre tratamento térmico. Richard e Cheyrezy (1995) afirmam que o quartzo, quando apresenta diâmetros entre 5 μm e 25 μm próximo ao tamanho médio das partículas de cimento, apresenta uma maior reatividade quando submetido a tratamento térmico.

Ainda segundo Richard e Cheyrezy (1995), a aplicação de altas temperaturas junto à aplicação de pressão durante o processo de cura do concreto fresco in-

fluencia na remoção do excesso de água do amassamento e aumenta a compactação e a densidade do concreto.

5. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais de Construção no Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). Os estudos foram divididos em cinco etapas, nas quais foram verificadas as características dos materiais, as adições e os processos, com foco na trabalhabilidade e na resistência mecânica como critério de escolha.

5.1. MATERIAIS UTILIZADOS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foram utilizados cimento CPV ARI, pó de quartzo e areia normal brasileira normatizada pela ABNT NBR 7214:2015, com malhas de #16 (1,18 mm), #30 (0,60 mm), #50 (0,30 mm) e #100 (0,15 mm). A utilização desse material fez com que os processos de verificação de adições se mantenham sempre padronizados, sem que ocorra interferência nos ensaios mecânicos.

Para o concreto final, a areia normal brasileira foi substituída pela areia de quartzo de forma graduada, conforme determinado pelo processo de empacotamento de partículas. As demais adições foram definidas de modo a se obter misturas com distribuição granulométrica próxima aos métodos em análise.

Os traços de verificação e o traço final foram dosados a partir de uma caracterização física dos materiais utilizados seguindo as normas técnicas. Os agregados e aglomerantes foram analisados quanto a sua granulometria (ABNT NBR NM 248:2003), massa específica (DNER-ME 194/98) e massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006).

5.2. AMASSAMENTO E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Devido à baixa trabalhabilidade e viscosidade elevada dos CPR, utilizou-se um processo de mistura específico proposto por Biz (2001). Fatores como a baixa relação água/cimento e a finura da mistura junto à necessidade de aditivo de atuação eletrostática exigem altas energias para amassamento, homogeneização e diminuição da viscosidade aparente das misturas. Para tanto, além de rotinas específicas, foi necessário o uso de argamassadeira planetária com diferentes velocidades de mistura.

Após a mistura, foram efetuados os seguintes ensaios com o concreto no estado fresco: determinação do índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016), caracterização reológica pelo método *squeeze-flow* (ABNT NBR 15839:2010) e determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - ABNT NBR 13278:2005. Esses ensaios permitem caracterizar a amostra com base na sua consistência, trabalhabilidade e ar incorporado.

Posteriormente foram moldados doze corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento com duas camadas aplicando-se 30 golpes por camada. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e colocados em tratamento de cura por imersão em água à temperatura ambiente.

5.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Em cada etapa de verificação, foram realizados ensaios de natureza mecânica a fim de verificar a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Características físicas como massa específica e absorção também foram analisadas, possibilitando traçar um perfil do traço analisado.

No estado endurecido foram realizados os ensaios de determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997), de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (ABNT NBR 15630:2008), de determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (ABNT NBR 13279:2005) e de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT NBR 9778:2009).

5.3. PROCESSO DE DOSAGEM

O processo de dosagem foi dividido em cinco etapas nas quais foram determinados, respectivamente, o melhor aditivo e a porcentagem ideal a ser utilizada no concreto de pós-reativos, a influência do material pozolânico na resistência mecânica, a determinação de diferentes métodos de dosagem por empacotamento de partículas, a análise de diferentes processos de cura e a influência mecânica da utilização de fibras metálicas.

5.3.1. Determinação do aditivo

Foram utilizados na pesquisa quatro aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos de 2ª e 3ª gerações em porcentagens de 3%, 5% e 7% em relação ao teor de cimento, a fim de analisar a influência da superdosagens na consistência e na resistência mecânica dos concretos de pós-reativos.

5.3.2. Análise das adições minerais

Foram estudadas blendas de sílica ativa, metacaulim e pozolana, como substituição máxima de 25% em relação ao cimento. Os ensaios foram realizados com base na norma técnica ABNT NBR 5752:2014, de modo a se determinar a mistura das pozolanas mais reativa.

5.3.3. Dosagem através de métodos granulométricos

Após definição do aditivo e das adições pozolânicas, foram realizadas dosagens através dos métodos de empacotamento de partículas em estudo. Foram

testados três métodos de dosagem com diferentes coeficientes de distribuição, como exposto no quadro 1.

Os traços foram verificados no estado endurecido aos 28 dias, conforme citado no item 5.3. A mistura que apresentar os melhores resultados será definida como traço final.

QUADRO 1. Modelos de Dosagem e Coeficientes de Distribuição

Modelo de Dosagem	Coeficiente de distribuição	Denominação
Andreasen	0,2	Traço 9
	0,25	Traço 10
	0,3	Traço 11
	0,4	Traço 12
Andreasen Modificado	0,2	Traço 14
	0,3	Traço 15
	0,4	Traço 16
Fuller	0,5	Traço 17

Fonte: Próprio autor

5.3.4. Processos de cura

Após a escolha do traço final, foram analisados diferentes processos de cura. Foram moldados 24 corpos de prova, dos quais 12 foram confinados em pressão de 1,2 MPa por 4 horas e os demais permaneceram em condições normais. Após 24 horas, efetuou-se a cura térmica com temperatura de 90 °C em 6 dos corpos de prova confinados, sendo os demais submersos em água à temperatura ambiente. O mesmo processo foi repetido com os 12 corpos de prova restantes.

6. RESULTADOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO

A determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos foi realizada conforme descrições da ABNT NBR NM 248:2001. Foram ensaiadas três areias com composição quartzosa, a fim de determinar qual agregado seria mais adequado para compor o traço. Todas apresentaram módulos de finura abaixo da faixa determinada pela ABNT NBR 7211:2009, para agregados miúdos do concreto, que varia de 1,55 a 2,20. No entanto, além de a norma ser específica para concretos convencionais, ainda se ressalta que valores diferentes dessas faixas podem ser aceitos desde que seja comprovada sua aplicabilidade durante a dosagem, visto que o concreto de pós-reativos apresenta diâmetros abaixo de 2 mm como característica. Tal fator não foi determinante na escolha dos agregados utilizados. Por

apresentar diâmetro máximo maior que 2 mm, a areia de quartzo 3 não foi aprovada.

O ensaio da determinação da composição granulométrica dos aglomerantes e adições foi realizado por sedimentação conforme ABNT NBR 7181:2016. Os pós de quartzo 1 e 2 apresentaram resultados semelhantes, portanto, adotou-se o pó de quartzo 1 como padrão para os demais ensaios, visto que a utilização dos dois não iria agregar na composição granulométrica dos traços.

O ensaio de massa específica dos agregados foi realizado através do método do frasco de Chapman, conforme a DNER-ME 194:1998, e para os aglomerantes e adições, adotou-se o método pelo frasco de Le Chatelier de acordo com a ABNT NBR NM 23:2001. Para a determinação da massa unitária dos materiais, utilizou-se uma adaptação da ABNT NBR NM 45:2006. Os resultados encontram-se na tabela 1.

TABELA 1. Resultados do ensaio de massa específica e massa unitária

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)
Areia de quartzo 1	2,65	1,57
Areia de quartzo 2	2,65	1,51
Pó de quartzo 1	2,60	1,01
Sílica	2,06	0,48
Metacaulim	2,60	0,46
Pozolana	1,97	0,94
Cimento	3,08	0,93

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

6.2. ANÁLISE DOS ADITIVOS

Para análise inicial, foram determinados o aditivo e a porcentagem em relação à massa de cimento que resultaria em resistências mais elevadas. Foram utilizados quatro aditivos, denominados A, B, C e D, nas porcentagens 3, 5 e 7% da massa de cimento. Como parâmetro de avaliação, os traços produzidos foram verificados no estado fresco e endurecido. Na tabela 2 é possível verificar os valores obtidos de espalhamento do concreto através do ensaio de *Flow Table*.

TABELA 2. Espalhamento

Aditivo	Espalhamento (mm) em relação à porcentagem		
	3%	5%	7%
Aditivo A+B	125,2	213,4	241,7
Aditivo C	125,6	216,2	232,8
Aditivo D	148,5	247,2	254,5

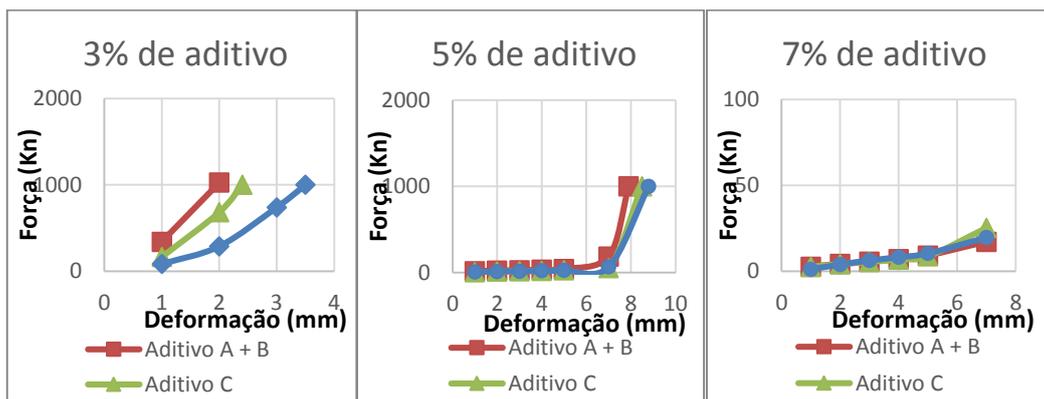
Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Foi possível observar que o aditivo D apresentou uma influência maior na consistência do concreto em relação aos demais, entretanto, somente com o acréscimo de 5% e 7% de aditivo, foi possível observar uma real interferência.

Com 7% de adição, todos os aditivos ainda agregaram de forma positiva no acréscimo do espalhamento do concreto, indicando que possivelmente não se haveria chegado à sua dosagem máxima, visto que Metha e Monteiro (1986) sugerem que, quando alcançam a superdosagem, há presença de segregação, perda e abatimento. Entretanto, conforme pode ser visualizado na tabela 2, o ganho de espalhamento mais relevante se deu com teor de 5%, enquanto o teor de 7% já demonstra pouco ganho relativo.

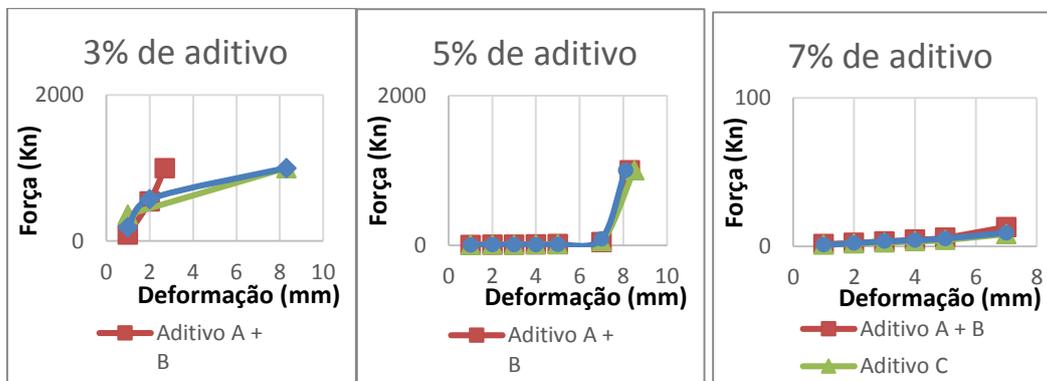
Posteriormente o comportamento reológico das amostras foi verificado através dos ensaios de *squeeze-flow*. Os gráficos 1, 2 e 3 foram dispostos de acordo com a taxa de cisalhamento aplicada e a porcentagem de aditivo.

GRÁFICO 1. Ensaio de *squeeze-flow* com taxa de cisalhamento de 3 mm/s



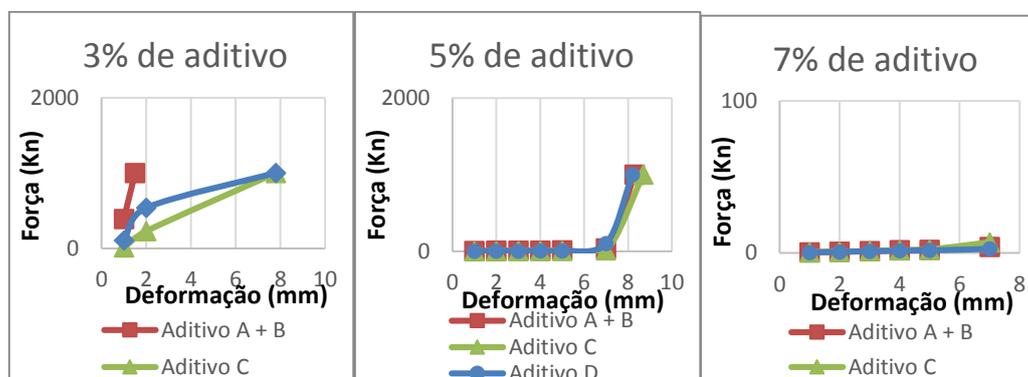
Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

GRÁFICO 2. Ensaio de *squeeze-flow* com taxa de cisalhamento de 1 mm/s



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

GRÁFICO 3. Ensaio de *squeeze-flow* com taxa de cisalhamento de 0,1 mm/s



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

No ensaio de *squeeze-flow*, quanto mais inclinada a curvatura, pior é a trabalhabilidade do material para a taxa de solitação imposta. Pode-se perceber que em todos os casos, para 7% foi possível obter uma melhor trabalhabilidade do concreto, podendo ser concluído que, dentre as relações de aditivo, 3% foi a que apresentou pior trabalhabilidade. Assim como no trabalho de Cardoso (2009), foi acrescentado o ensaio com velocidade de cisalhamento de 1 mm/s de modo a caracterizar melhor o comportamento reológico das misturas, apresentando resultados finais próximos às taxas pedidas pela ABNT NBR 15839:2010.

Para avaliação no estado endurecido, foram moldados 12 corpos de prova de cada traço, os quais foram rompidos por compressão axial aos 7 e 28 dias de idade e cura. Para cada idade foi possível obter os seguintes resultados para cada aditivo e teor adicionado, demonstrados na tabela 3:

TABELA 3. Resultados de Resistência Aditivos Adicionado

ADITIVO	PORCENTAGEM	RESISTÊNCIA (7 dias) MPa	RESISTÊNCIA (28 dias) MPa
Aditivo A + Aditivo B	3%	70,40	63,70
	5%	66,40	65,70
	7%	54,50	56,80
Aditivo c	3%	64,60	57,70
	5%	80,40	96,30
	7%	75,50	75,70
Aditivo d	3%	67,10	79,50
	5%	66,40	76,20
	7%	54,20	63,50

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Concretos de alto desempenho com a utilização de maiores porcentagens de aditivos superplastificantes têm por característica se apresentarem como fluidos não newtonianos. Isso significa que a tensão de cisalhamento não é proporcional à taxa de deformação, o que limita o conceito de trabalhabilidade de consistência desse tipo de concreto. É possível analisar esse tipo de material através da correlação entre a taxa de tensão de cisalhamento e a deformação apresentada. Quanto maior a deformação do fluido com uma menor taxa de tensão de cisalhamento, melhor a consistência do material.

Observou-se, através dos ensaios obtidos, que a porcentagem 5% apresentou uma melhor eficiência no quesito resistência/consistência. Na velocidade de 3mm/s e com 3% de adição, o aditivo D apresentou melhores resultados que os demais, contudo, mas não foi suficiente para deixar o concreto trabalhável. Com 5% e 7% de adição, os aditivos C e D se destacaram de forma discreta e obtiveram valores aproximados.

Os mesmos resultados se repetiram nas demais velocidades, o aditivo A + B apresentou uma curva mais acentuada que os demais aos 3% de adição, e aos 5% e 7%, todos os aditivos apresentaram-se de forma similar.

Com 7% de adição, as amostras apresentam uma consistência mais trabalhável, entretanto, essa alta dosagem influenciou de forma negativa nos resultados de compressão axial. Com a utilização do aditivo D em especial, observou-se uma retardação na pega, fator que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

Avaliando o quesito resistência final, pode-se concluir que o aditivo C apresentou resultados mais favoráveis de resistência aos 7 e 28 dias de idade, fator usado como critério de escolha, haja vista a similaridade dos resultados no estado fresco.

6.3. POZOLANA

Em primeiro plano foi avaliada a adição de sílica ativa e metacaulim, apresentando-se na Tabela 4 os resultados de compressão e a resistência à tração por flexão aos 7 e 28 dias, obtidos para misturas com substituição máxima de 25% da massa do aglomerante.

Pode-se observar, por meio da tabela 4, que os concretos com maiores adições de metacaulim apresentaram uma maior resistência inicial em relação aos de sílica, visto que o metacaulim possui, além do seu efeito pozolânico, o chamado efeito-filer, que, devido a sua finura, colabora para ampliar a coesão do concreto, diminuindo assim a sua porosidade, fator visto desde as idades iniciais. A sílica age de forma química, processo mais prolongado em que, através das reações pozolânicas, o silício de cálcio hidratado reage com o hidróxido de cálcio, auxiliando assim no ganho de resistência.

Constatou-se que a proporção 5% de metacaulim e 20% de sílica ativa apresentou melhor desempenho aos 28 dias, tanto no quesito compressão quanto flexão. Isso se deve à melhora na zona de transição entre agregado/pasta, conforme afirmam Monteiro e Mehta (1986): “o processo de refinamento dos poros e dos

cristais presentes na pasta de cimento proporcionado pelas adições tem um papel fundamental no aumento das resistências mecânicas, na medida que aumenta a resistência da matriz na zona de transição”.

TABELA 4. Resultados de resistência na proporção de pozolonas

RELAÇÃO metacaulim/sílica	RESISTÊNCIA COMPRESSÃO (MPa)		RESISTÊNCIA FLEXÃO (MPa)	
	7 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
0%/0%	50,48	53,54	7,52	8,72
0%/25%	61,35	74,20	10,00	12,68
5%/20%	62,09	75,85	10,69	11,33
10%/15%	62,48	71,12	9,78	11,56
15%/10%	63,29	72,57	9,97	10,48
20%/5%	65,91	70,43	10,52	11,19
25%/0%	67,71	74,09	10,58	11,41

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Após a escolha das porcentagens de metacaulim e sílica, foi efetuada a análise da adição de pozolana, mantendo a substituição da massa de cimento em 25%, proporcionado metacaulim /sílica e pozolana. A tabela 5 apresenta os resultados máximos aos 7 e 28 dias para cada porcentagem, demonstrando resistências à compressão e à tração.

TABELA 5. Resultados de resistência na Proporção de pozolonas

RELAÇÃO metacaulim/sílica/ pozolana	RESISTÊNCIA COMPRESSÃO (MPa)		RESISTÊNCIA FLEXÃO (MPa)	
	7 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
0%/0%/25%	42,45	53,78	6,88	7,84
1%/4%/20%	46,41	59,18	7,38	9,59
2%/8%/15%	53,50	66,91	8,45	10,39
3%/12%/10%	55,01	67,67	8,98	11,03
4%/16%/5%	58,28	73,13	9,81	11,86
5%/20%/0%	61,08	82,14	9,92	12,34

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Pelos resultados apresentados na tabela 5, percebe-se que a proporção 5% de metacaulim e 20% de sílica, sem adição do material pozolânico, demonstrou maior eficiência quanto à resistência de compressão e flexão nas idades analisadas.

Dessa maneira, para a composição do traço final, foram adotados 20% sílica e 5% metacaulim para substituição da massa do aglomerante cimento.

6.4. ANÁLISE DOS PROCESSOS DE DOSAGENS

Para escolha do traço foram analisados sua trabalhabilidade de forma visual e sua resistência à compressão e à tração por flexão. Na tabela 6 é possível observar o desenvolvimento dos resultados de compressão axial obtidos.

TABELA 6. Resultados à compressão

Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Flexão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Traço 9	104,2	127,5	20,2	21,2
Traço 10	115,2	137,3	23,9	27,5
Traço 11	118,8	133,7	23,1	26,9
Traço 12	100,1	124,8	21,2	24,4
Traço 14	111,9	137,5	24,1	26,4
Traço 15	95,0	119,0	14,3	23,3
Traço 16	94,8	117,3	13,9	22,9

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Os traços também foram avaliados quanto às suas características físicas. Na tabela 7 é possível observar os dados obtidos nos ensaios de massa específica e de absorção e módulo de elasticidade dinâmica.

TABELA 7. Resumo dos resultados dos ensaios físicos

Traços	Massa específica (g/cm ³)	Absorção	Índice de vazios	Módulo de elasticidade (GPa)
9	2,28	1,2%	2,6%	45,07
10	2,32	3,0%	6,8%	48,08
11	2,23	10,9%	22,0%	29,86
12	2,21	11,7%	23,1%	28,86
14	2,22	11,6%	23,1%	31,52
15	2,11	15,6%	28,5%	13,64
16	2,18	12,4%	24,0%	26,76

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Após a mistura dos traços, foi concluído que o traço resultante do processo

de Andreasen com coeficiente de empacotamento 0,25 apresentou melhor eficiência nos quesitos mecânicos analisados. Somente o traço com empacotamento de 0,2 de Andreasen apresentou uma consistência trabalhável, fator possivelmente explicado pelo maior consumo de cimento.

O traço obtido pelo método de Fuller apresentou-se de forma totalmente inconsistente, exigindo, assim, uma alteração na relação água/aglomerante ou na porcentagem de aditivo adicionado. Tal fato pode ser explicado devido ao baixo consumo de cimento do traço e ao alto consumo de agregados, tornando a necessidade do aumento a/c um fator determinante.

Assim como afirmam Castro e Pandolfelli (2009), valores do coeficiente de distribuição devem ser menores que 0,30; assim, a consideração de q com valores próximos a 0,30 favorece a produção de concretos adensados sob vibração, enquanto que valores menores que 0,25 resultam em misturas alto adensáveis. O efeito da redução do valor do coeficiente de distribuição se dá no aumento da quantidade de finos, o que influencia a interação entre as partículas.

Devido ao fato de se ter padronizado esses valores, almejando uma verificação mais precisa da composição granulométrica, optou-se por não moldar tal traço. Os demais traços também se apresentaram com uma baixa trabalhabilidade, não permitindo ensaios no estado fresco.

Concretos de alto desempenho têm por característica possuir um baixo índice de vazios, “devido à baixa permeabilidade, com a porosidade podendo chegar a 10% da encontrada em concretos tradicionais e a porometria chegando em alguns casos à eliminação total de macroporos” (ASSIS *et al*, 2007). Helene (1983) ainda classifica os concretos, de acordo com a sua absorção, em: 1) duráveis, quando a absorção possui percentuais menores que 4,2%; 2) normais, quando esse valor está entre 4,2% e 6,3%; e 3) concretos deficientes, quando o percentual de absorção é superior a 6,3%. Contudo, observou-se que os traços 11, 12, 14, 15 e 16, apesar dos altos valores de resistência à compressão, apresentaram valores de índice de vazios e absorção que os caracterizam como concretos deficientes. Esses valores podem ser explicados devido à baixa trabalhabilidade do concreto, o que impediu o seu perfeito adensamento.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico dos traços 11, 12, 15 e 16 também foram aquém do esperado. Esses valores podem ser justificados devido ao elevado índice de vazios e ao baixo consumo de cimento. Castro, Liborio e Pandolfelli (2011) afirmam que “a resistência mecânica e o módulo de elasticidade são reduzidos proporcionalmente com o volume de poros inativos e são influenciados pelo volume de poros ativos e pela umidade dentro deles”.

6.4. ANÁLISE DA CURA TÉRMICA

Após a definição do traço, foram realizados diferentes processos de cura, a fim de verificar qual possui uma melhor influência nos resultados de resistência mecânica. Na tabela 8 é possível observar os valores de resistência à compressão e à tração por flexão dos traços analisados.

TABELA 8. Resistência à compressão e à tração por flexão para diferentes temperaturas de cura térmica

Tipo de Cura	Resistência à Compressão(MPa)		Resistência à Flexão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
25°	128,33	132,38	108,88	135,63
90°	150,40	162,62	147,39	153,78
95°	160,85	147,79	159,85	139,35

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Aos sete dias, todos os corpos de prova que foram confinados nas primeiras 8 horas após a moldagem e foram expostos a uma temperatura mais elevada durante a cura apresentaram uma resistência mecânica superior aos demais. Entretanto, aos 28 dias, os corpos de prova com 120°C e 95°C apresentaram uma redução na resistência mecânica.

A justificativa para esse fenômeno de redução de resistência pode ser explicada devido ao alto fator densidade do concreto. Por ser um concreto muito denso, mesmo em idades precoces, ele não permite um transporte suficientemente rápido da água de cura para o interior dos elementos de concreto, pois, conforme Mechtcherine e Dudziak (2012), concretos de alta resistência apresentam microestrutura muito densa. Portanto, foi escolhido como método mais adequado a cura com confinamento, tratamento térmico com os corpos de prova submersos e em temperaturas entre 100°C a 115°C.

6.5. ANÁLISE DO TRAÇO FINAL

Após todos os processos, foram moldados 6 corpos de prova, em que foram combinados os materiais com melhores eficiências nas etapas anteriores, e realizados os ensaios de compressão e flexão, para testar a eficiência dos materiais combinados. O traço final é apresentado na tabela 9:

TABELA 9. Traço final

Traço final	
Cimento	1,000
Quartzo Rosa	0,661
Quartzo Branco	1,1
Metacaulim	0,050
Sílica	0,200
Pó quartzo	0,440
Água/aglomerante	0,2
Aditivo	0,05
Fibras	0,03

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Após processos de moldagem e cura confinada, os CPs foram submetidos aos ensaios nas idades de 7 e 28 dias e apresentaram os resultados dispostos na tabela 10.

TABELA 10. Resistência à Compressão e resistência à Flexão

Idade	Resistência à Compressão(MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
7	179,82	21,21
28	161,21	19,37

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Assim como ocorrido durante os processos de curas, o traço final apresentou queda nas resistências à flexão e compressão na idade de 28 dias, comparado a 7 dias. Tal fato pode ser justificado pela retração autógena em que a água de hidratação é drenada do concreto e pela sua alta densidade. Não há uma reposição dessa água nas idades seguintes, o que ocasiona o aparecimento de microfissuras nas idades mais tardias. Na figura 25 é possível observar os corpos de prova após a ruptura por flexão.

FIGURA 1. Corpos de prova após ruptura



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

7. CONCLUSÕES

Por meio da realização de ensaios laboratoriais, foi possível realizar a caracterização física dos materiais empregados na pesquisa: pó de quartzo, areia de quartzo, cimento, metacaulim e sílica; e definir o tipo de aditivo, os materiais pozolânicos e o tipo de cura mais adequado para produzir um concreto com maior resistência mecânica.

Notou-se que os aditivos analisados nesta pesquisa contribuíram de forma significativa e semelhante no quesito consistência, porém, foi possível observar

que altas dosagens podem contribuir de forma negativa na resistência mecânica.

A adição de matérias pozolânicas é fundamental na composição de concretos de pós-reativos. Observou-se um crescimento de 30% da resistência à compressão em relação à amostra sem adições.

A dosagem por empacotamento granulométrico sofre influência de diversos fatores além da dimensão dos grãos. Nesta pesquisa, adotou-se uma dosagem na qual o empacotamento foi realizado com todos os materiais (aglomerantes, adições e agregados). Desta forma alguns traços apresentaram consumos de cimento mais elevados e outros muito aquém aos dos concretos tradicionais, acarretando em concretos com pouca trabalhabilidade. Entretanto, foi possível observar que o empacotamento sobressaiu a esse fator, visto que o traço definido como o mais eficiente não possuía o maior consumo de cimento entre os traços estudados.

A cura térmica com confinamento auxilia no ganho de resistência do concreto, contudo, é necessário avaliar essa questão de forma mais abrangente. O confinamento auxilia na redução dos índices de vazios e, desta forma, prejudica na hidratação do concreto resultando na perda de resistência nas idades mais elevadas. Nesta pesquisa, pôde-se observar que a cura em temperaturas de 100°C a 115°C agregou de forma mais eficiente as características do concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro 2014.

_____. *NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento: Especificação*. Rio de Janeiro 2015.

_____. *NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro 1996, versão corrigida 1997.

_____. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005, versão corrigida 2009.

_____. *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro 2016.

_____. *NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado* Rio de Janeiro 2005.

_____. *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.* Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica* Rio de Janeiro 2008, versão corrigida 2009.

_____. *NBR 15839: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*.* Rio de Janeiro, 2010.

_____. *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.* Rio de Janeiro 2001.

_____. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.* Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.* Rio de Janeiro 2006.

BINA, P. *Concretos de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto.* *Téchne.* São Paulo, Pini, ed. 38, 1999. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/38/artigo287168-1.aspx>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

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

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica*, [s.l.], 55(335): 223-251, 2009.

ASSIS, Joaquim Teixeira *et al.* Estudo da porosidade em concretos de alto desempenho por técnicas de processamento de imagens, 2007. Disponível em http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxi_cnmac/PDF/141.pdf.

FUNK, J.; DINGER, D. *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions - Applied to Ceramic Manufacturing*, Kluwer Academic Publishers. Boston, 1994.

LONDERO, C. *Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas.* 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MECHTCHERINE, Viktor; DUDZIAK, Lukasz. "Effects of superabsorbent polymers on

shrinkage of concrete: plastic, autogenous, drying”, in: *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*. Springer Netherlands, 2012, p. 63-98.

MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P.K. *Interaction between carbonate rock and cement paste*. *Cement and Concrete Research*, 16(2): 127-134, 1986.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

RICHARD, P; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7): 1501-1511, 1995.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. “Concreto de alto e ultra-alto desempenho”, in: *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011, p. 1283-1325.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. *Caderno de Engenharia de Estruturas*, 33(8): 115-148, 2006.