

Avaliação da influência da razão entre aberturas de peneiras sucessivas sobre o comportamento de concretos de cimento Portland dosados om base no conceito de empacotamento de partículas

Evaluation of the influence of the ration between successive sieve openings on the behavior of the Portland cement concrete dosed based on the particle packing concept.

Marcelle Matumoto (1); Alessandra Lorenzetti de Castro (2)

(1) *Graduanda em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*

(2) *Professora Doutora, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*

*Avenida Trabalhador são-carlense, 400 – Parque Arnold Schmidt. CEP 13566-590 – São Carlos – SP.
marcelle.matumoto@usp.br*

Resumo

Nos últimos anos, pesquisas têm sido desenvolvidas na área de tecnologia dos concretos em busca de materiais com desempenho mecânicos e de durabilidade superiores, em que ainda são utilizados métodos de dosagem tradicionais para definição da proporção ideal entre os materiais constituintes da mistura. Porém, é possível otimizar a composição dessas misturas aplicando-se o conceito de empacotamento de partículas, que tem como objetivo determinar uma distribuição de tamanho de partículas que resulte na maior densidade de empacotamento. Normalmente, um único parâmetro é levado em conta para descrever a distribuição granulométrica, e um dado importante a ser considerado consiste na razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, uma vez que dados mais detalhados são fornecidos quando considerados menores fatores entre os tamanhos das partículas. Assim, este trabalho busca avaliar a influência da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas sobre a eficiência do empacotamento de partículas e, assim, sobre a composição e o comportamento de concretos de cimento Portland. Para isso, após a caracterização dos materiais granulares constituintes das misturas do concreto, foram definidas as composições das misturas com base no modelo de empacotamento de Alfred, variando-se a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, sendo adotadas as razões de 2, $\sqrt{2}$ e $\sqrt[4]{2}$, e considerando dois valores para o coeficiente de distribuição ($q = 0,26$ e $q = 0,32$). Verificou-se que para o coeficiente $q = 0,32$, a razão de 2 pode ser usada, enquanto que para $q = 0,26$ é aconselhável a utilização da razão de $\sqrt{2}$ e/ou $\sqrt[4]{2}$.

Palavra-Chave: Concreto; Dosagem; Empacotamento de partículas; Abertura de peneiras; Propriedades.

Abstract

In recent years, studies have been developed in the area of concrete technology in search of materials with higher mechanical performance and durability, where traditional mix design methods are still used to be define the ideal proportion between the constituent materials of the mixture. However, it is possible to optimize the composition of these mixtures by applying the particle packing concept, which aims to determine a particle size distribution that results in the highest packing density. Normally, a single parameter is taken into account to describe the particle size distribution, and an important data to be considered is the ratio between the successive sieve openings. Thus, the present research aims to evaluate the influence of the ratio between successive sieve openings on the particle packing efficiency and so on the composition and behavior of Portland cement concretes. For this, after the characterization of the granular materials constituting the concrete mixtures, the compositions of the mixtures were defined based on Alfred's packing model, varying the ration between successive sieve openings, being adopted the ratios of 2, $\sqrt{2}$ and $\sqrt[4]{2}$, and, considering two values for the distribution coefficient ($q = 0.26$ and $q = 0.32$). For $q = 0,32$, the ratio of 2 can be used, while for $q = 0,26$, it is advisable to use the ratio of $\sqrt{2}$ and/or $\sqrt[4]{2}$.

Keywords: Concrete; Mix design; Particle packing; Sieve openings; Properties.

1 Introdução

Nos últimos anos, o interesse pelo conceito de empacotamento das partículas aumentou nas diferentes áreas da engenharia, uma vez que grande parte dos materiais naturais ou industriais utilizados diariamente contém partículas de diferentes formas e tamanhos. Além disso, a fluidez inicial de suspensões concentradas, como o concreto, também depende de características físicas como a distribuição granulométrica, índice de forma e textura superficial das partículas. Assim, o projeto da distribuição granulométrica das partículas é de fundamental importância, pois promove o empacotamento e, juntamente com o fluido, define as propriedades reológicas do material durante o processo de mistura e quando no estado fresco (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim, sucessivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Dessa forma, o empacotamento de partículas é importante na obtenção de concretos, principalmente por melhorar suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Os estudos teóricos e experimentais nesta área resultaram em duas abordagens básicas: uma discreta, que considera as partículas individualmente (modelo de Furnas); e outra contínua, proposta por Andreasen, que trata as partículas como distribuições contínuas. Funk e Dinger (1994) realizaram uma extensa análise comparativa entre esses modelos, e chegaram na conclusão que ambos convergiam matematicamente para uma mesma solução (Equação 1), usualmente conhecida como modelo de Alfred:

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D_p , D_p é o diâmetro da partícula, D_l é o diâmetro da maior partícula da distribuição, D_s é o diâmetro da menor partícula da distribuição, e q é uma constante, designada por módulo ou coeficiente de distribuição.

Por meio de simulações computacionais foi verificado que valores de q menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto para valores acima de 0,37, verifica-se sempre uma porosidade residual (FUNK; DINGER, 1994). Para uma mistura apresentar boa capacidade de escoamento, o valor do coeficiente de distribuição deve ser menor que 0,30. Assim, a consideração de q com valores próximos a 0,30 favorece a produção de concretos adensados sob vibração, enquanto valores menores que 0,25 resultam em misturas autoadensáveis (VANDERLEI, 2004). O efeito da redução do valor do coeficiente de distribuição se dá no aumento da quantidade de finos, que influencia a interação entre as partículas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O estudo do empacotamento de partículas tem como objetivo determinar uma distribuição de tamanho de partículas que resulte na maior densidade de empacotamento. Porém, essa ideia não garante a eficiência máxima de empacotamento, pois outras propriedades além do tamanho de partículas influenciam no resultado.

De uma forma geral, no caso de partículas esféricas, o empacotamento aleatório de monodispersões resulta sempre em um mesmo fator de empacotamento. Porém, a forma das partículas dos materiais granulares que comumente compõem as misturas de concreto está distante de uma esfera e deve-se admitir que, tradicionalmente na tecnologia dos concretos, pouca atenção é dada à busca por uma distribuição granulométrica ótima dessas partículas. Além disso, ao estudar o comportamento dos concretos depara-se com um problema relacionado com a garantia de se reproduzir materiais com uma distribuição granulométrica precisa, isto é, as matérias-primas nem sempre apresentam uma distribuição granulométrica contínua e reprodutível ao longo do tempo.

Normalmente um único parâmetro é considerado para descrever a distribuição granulométrica de um material granular como, por exemplo, a dimensão máxima característica ou o tamanho médio das partículas (d_{50}). Neste sentido, tanto distribuições contínuas que contemplam um grande intervalo de tamanho de partículas, quanto distribuições uniformes que contemplam apenas um pequeno intervalo de tamanho de partículas, podem atender de maneira satisfatória esse único parâmetro especificado. No entanto, esses materiais podem apresentar distribuições granulométricas bem distintas, resultando em comportamentos totalmente diferentes quando da produção dos concretos. Assim, de acordo com Funk e Dinger (1994), a base de qualquer discussão sobre os efeitos das propriedades físicas de um material granular demanda uma completa descrição da sua distribuição granulométrica, incluindo desde o menor até o maior tamanho de partícula presente na composição.

Um dado importante para descrever a distribuição granulométricas das partículas de um material consiste na relação entre as aberturas de peneiras sucessivas utilizadas no ensaio, ou seja, a razão entre os descritores do tamanho das partículas associados à abertura das peneiras (FUNK; DINGER, 1994). Estes termos referem-se aos fatores que relacionam o tamanho do limite de uma classe de peneira ao tamanho do limite da classe de peneira de tamanho adjacente, sendo normalmente consideradas as razões de 2, $\sqrt{2}$ e $\sqrt[4]{2}$.

Dados mais detalhados são obtidos quando são considerados valores de razão menores entre as aberturas de peneiras sucessivas. Segundo Funk e Dinger (1994), a utilização de um maior número de peneiras diminui a porcentagem de partículas retidas em cada intervalo, aumentando a precisão.

Na prática da construção civil, o fator 2 é comumente utilizado, enquanto que em outras áreas que utilizam o conceito de empacotamento de partículas na formulação de misturas de alto desempenho, os fatores $\sqrt{2}$ e $\sqrt[4]{2}$ são mais frequentes. Assim, no presente artigo, é avaliada a influência da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas sobre a eficiência do empacotamento de partículas e, assim, sobre a composição e o comportamento de misturas de concreto de cimento Portland.

2 Materiais e métodos

Primeiramente, foi feita a caracterização de todos os materiais granulares constituintes das misturas de concreto, ou seja, cimento, agregados miúdo e graúdo, e adições minerais, sendo todos os materiais selecionados para o estudo amplamente utilizados na prática e comercialmente disponíveis no mercado da construção civil, a saber:

- cimento Portland composto com pozolana, de classe de resistência de 32 MPa (CPII Z 32);
- duas areias naturais, de origem quartzosa, classificadas como areia fina e média;
- três britas de origem basáltica, comercialmente identificadas como brita 1, brita 0 e pedrisco;
- sílica ativa derivada do processo de produção do silício metálico ou ferro silício.

Conhecendo-se as características dos materiais granulares constituintes dos concretos, determinadas seguindo as normas NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009a), NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009b), NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), NBR 16372:2015 (ABNT, 2015) e NBR 16605: 2017 (ABNT, 2007), foram definidas as composições das misturas do concreto utilizando o conceito de empacotamento de partículas, por meio do modelo de Alfred. Para isso, foram considerados dois valores para o coeficiente de distribuição, $q = 0,26$ e $q = 0,32$, que são valores normalmente considerados na produção de concretos adensados sob vibração.

Para a avaliação da influência da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas sobre a eficiência do empacotamento de partículas e, conseqüentemente, seu efeito na composição e no comportamento de misturas de concreto, foram considerados diferentes fatores entre os descritores do tamanho das partículas, sendo adotadas as razões de 2 , $\sqrt{2}$ e $\sqrt[4]{2}$.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização dos materiais granulares

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais granulares considerados para a produção dos concretos são apresentados na Tabela 1, enquanto que as curvas da distribuição granulométrica discreta de cada um deles são apresentadas na Figura 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais granulares constituintes das misturas de concreto.

Propriedade	Material granular constituinte						
	Sílica ativa	Cimento	Areia fina	Areia média	Pedrisco	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm ³)	2,20	3,05	2,42	2,47	2,84	2,92	2,97
Área superficial específica - Blaine (cm ² /g)	3960	17900	---	---	---	---	---
Diâmetro máximo característico (mm)	---	---	0,60	2,36	6,3	9,5	19
Módulo de finura	---	---	1,2	2,4	3,4	5,9	6,6

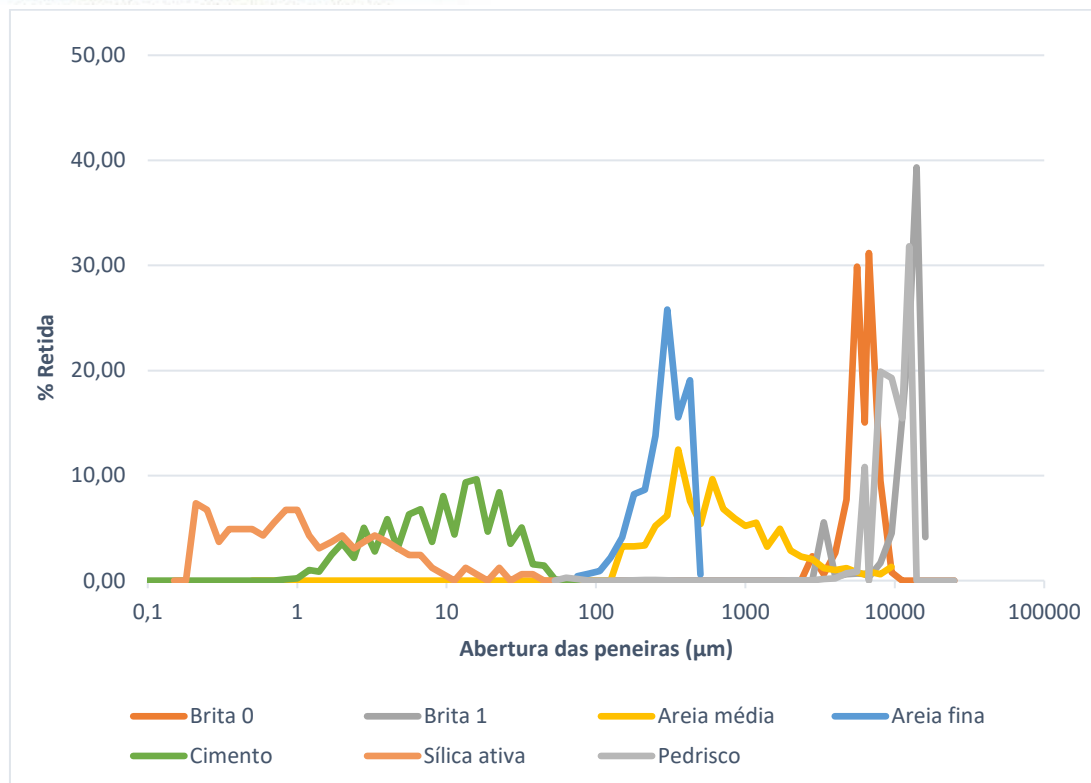


Figura 1 – Distribuição granulométrica dos materiais granulares constituintes das misturas de concreto.

3.2 Definição da composição das misturas de concreto

A dosagem dos concretos foi realizada com base no conceito de empacotamento de partículas, utilizando o modelo de Alfred. Adotando as razões de 2, $\sqrt{2}$ e $\sqrt[4]{2}$ entre as aberturas de peneiras sucessivas, as composições dos concretos foram definidas a partir de um processo de otimização matemática (ferramenta Solver do *software* Microsoft Excel), que utiliza como dados de entrada a distribuição granulométrica discreta dos materiais granulares constituintes da mistura e o coeficiente de distribuição q . O programa iterativamente calcula o diâmetro da maior e menor partícula da mistura fornecendo a curva granulométrica teórica resultante do modelo de Alfred. Simultaneamente, o teor de cada material granular constituinte é ajustado a fim de obter o máximo coeficiente de correlação (R^2) entre as curvas experimental e teórica. As Figuras 2 e 3 apresentam o ajuste das curvas teórica e experimental da distribuição granulométrica dos concretos para as diferentes razões de abertura de peneiras, considerando valores de $q = 0,32$ e $q = 0,26$, respectivamente. As composições das misturas de concreto obtidas aplicando-se o modelo de empacotamento de Alfred, dadas em porcentagem em massa de cada material granular constituinte, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, bem como o coeficiente de correlação (R^2) obtido para cada uma delas.

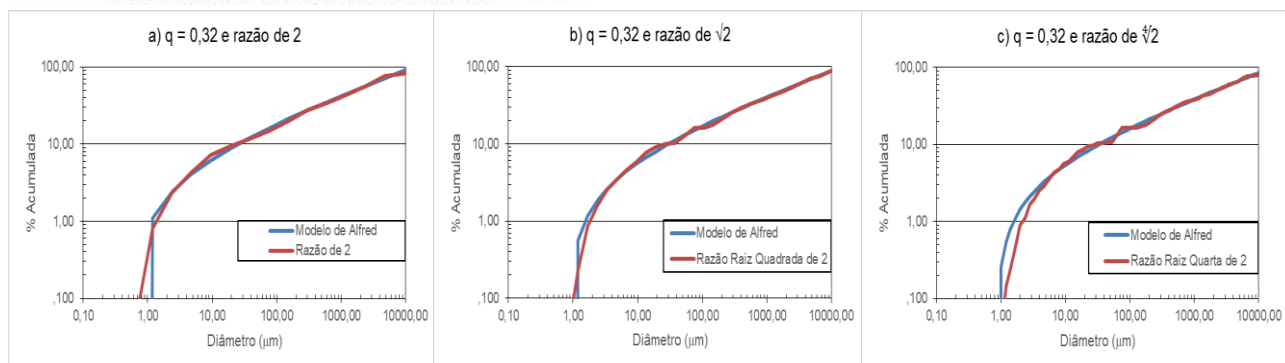


Figura 2 - Curvas de distribuição granulométrica para $q = 0,32$.

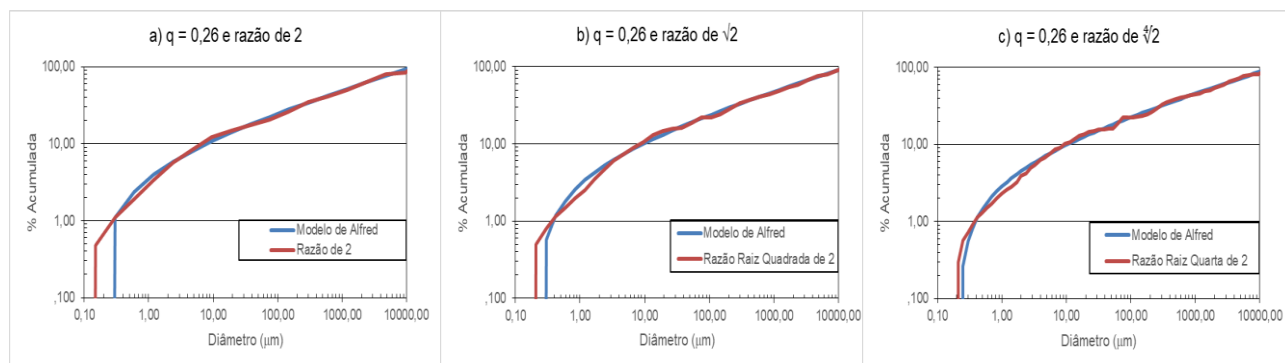


Figura 3 - Curvas de distribuição granulométrica para $q = 0,26$.

Tabela 2 – Proporção (porcentagem em massa) dos materiais granulares da mistura para $q = 0,32$.

Razão	2	$\sqrt{2}$	$\sqrt[4]{2}$
Brita 1	25,00	26,30	23,31
Brita 0	17,67	10,57	12,50
Pedrisco	32,75	37,10	36,63
Areia média	14,89	15,73	16,86
Areia fina	0	0	0
Cimento	9,69	10,31	10,70
Sílica ativa	0	0	0
R ²	0,994	0,998	0,998

Tabela 3 – Proporção (porcentagem em massa) dos materiais granulares da mistura para $q = 0,26$.

Razão	2	$\sqrt{2}$	$\sqrt[4]{2}$
Brita 1	21,13	22,38	20,57
Brita 0	14,78	8,09	8,83
Pedrisco	33,89	38,05	41,59
Areia média	11,57	11,85	5,43
Areia fina	3,35	3,53	7,54
Cimento	11,90	12,60	11,98
Sílica ativa	3,38	3,50	4,06
R^2	0,994	0,999	0,998

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 2 e 3, percebe-se que há uma pequena diferença entre as curvas experimentais e teóricas, visto que os modelos tradicionais de empacotamento de partículas são elaborados a partir de simplificações, onde não se leva em conta o formato das partículas. Além disso, as curvas teóricas e experimentais não foram totalmente coincidentes devido à pequena quantidade de materiais finos utilizados. A falta desses materiais foi justificada por não se utilizar, na prática, materiais mais finos que a sílica ativa na composição de misturas de concreto de alta resistência. Em concretos com resistência moderada, o material mais fino normalmente utilizado é o cimento Portland. Ainda assim, foram obtidos elevados coeficientes de correlação entre as curvas teóricas e experimentais (todos superiores a 0,99), independente do valor de q e da razão entre aberturas de peneiras sucessivas, indicando um excelente ajuste entre as curvas e, consequentemente, misturas otimizadas com máximo empacotamento em cada consideração adotada.

Com relação às composições dos concretos, analisando as porcentagens em massa dos materiais granulares constituintes apresentadas nas Tabelas 2 e 3, é possível observar que para o menor q ($q = 0,26$), houve um aumento na proporção de sílica e de areia fina, devido ao ajuste da fração mais fina da curva. Além disso, houve uma diminuição no consumo de brita 0, brita 1 e de areia média, em cerca de 23%, 14% e 38%, respectivamente. O aumento do teor de materiais finos com a redução do valor do coeficiente de distribuição já era esperado de acordo com a literatura (CASTRO, PANDOLFELLI, 2009).

Em relação às composições obtidas para um mesmo q , não houve grandes mudanças na composição para $q = 0,32$ ao variar a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, indicando que pode ser utilizada a razão de 2 para a definição da composição dos concretos.

Já para concretos com $q = 0,26$, há uma diminuição considerável no consumo de brita 0 e areia média, em aproximadamente 40% e 53%, respectivamente, e um aumento no consumo de pedrisco (cerca de 10%), à medida que se diminui a razão entre as aberturas sucessivas das peneiras, sendo aconselhável a utilização da razão de $\sqrt{2}$ e/ou $\sqrt[4]{2}$ para a formulação desses concretos pelo empacotamento de partículas.

3.3 Análise estatística do consumo de cimento

Para analisar a influência do conceito de empacotamento de partículas na dosagem dos concretos e, assim, a influência do valor do coeficiente de distribuição e da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas no teor de cimento das composições obtidas, foi feito o cálculo teórico do consumo de materiais das misturas, adotando a relação água/cimento calculada a partir de um teor de águas/materiais secos (H) de 7,5% apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Consumo dos materiais constituintes da mistura de concreto, para $q = 0,32$.

Razão	2	$\sqrt{2}$	$\sqrt[4]{2}$
Brita 1	558	587	520
Brita 0	394	236	279
Pedrisco	731	828	818
Areia média	332	351	376
Areia fina	0	0	0
Cimento	216	230	239
Sílica ativa	0	0	0
Água	167	167	167

Tabela 5 – Consumo dos materiais constituintes da mistura de concreto, para $q = 0,26$.

Razão	2	$\sqrt{2}$	$\sqrt[4]{2}$
Brita 1	472	500	459
Brita 0	330	181	197
Pedrisco	757	849	929
Areia média	258	265	121
Areia fina	75	79	168
Cimento	266	281	267
Sílica ativa	75	78	91
Água	167	167	167

Analisando em particular o consumo de cimento, verifica-se que o consumo deste material constituinte aumentou com a redução do valor de q , o que já era esperado, uma vez que a quantidade de materiais finos aumenta com redução do coeficiente de distribuição (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Considerando um mesmo valor para o coeficiente de distribuição, mas variando a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, verifica-se que houve um aumento do consumo de cimento com a redução da razão, entre as aberturas de peneiras sucessivas para as misturas formuladas com $q = 0,32$, enquanto que para as

misturas formuladas com $q = 0,26$ o consumo de cimento permaneceu praticamente constante ao reduzir a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas.

A fim de verificar se as diferenças observadas no consumo de cimento das misturas formuladas são significadas, foi realizada a análise estatística dos resultados, por meio do teste t de *Student*, considerando um nível de confiança de 95%, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Teste t para avaliar a diferença do consumo de cimento ao variar o valor de q .

GL	t	P (T ≤ t) bi-caudal	t crítico	Diferença significativa?
4	5,2372	0,0077	2,57764	Sim

Considerando a composição das misturas, dada em termos de porcentagem em massa (Tabelas 2 e 3), não foram observadas grandes diferenças entre as proporções de cimento obtidas para um mesmo coeficiente de distribuição, variando a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas. No entanto, entre os dois coeficientes de distribuição, verificou-se um aumento na proporção de cimento com a redução do valor do coeficiente de distribuição, independente da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, em função do aumento de materiais finos esperado para estas composições ($q = 0,26$). Apesar das proporções de cimento serem próximas entre as composições formuladas considerando ambos os coeficientes de distribuição, de acordo com a análise estatística realizada (Tabela 6), verifica-se uma diferença significativa no consumo de cimento calculado para as composições formuladas no estudo.

4 Conclusões

O modelo de empacotamento utilizado (modelo de Alfred) considera na sua formulação partículas perfeitamente esféricas, desconsiderando a influência da morfologia das mesmas. Esta limitação do modelo teórico, resultou em uma dispersão entre os resultados obtidos, isto é, no ajuste entre as curvas teórica e experimental. No entanto, independente do valor do coeficiente de distribuição e da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, foram obtidos elevados coeficientes de correlação entre as curvas teóricas e experimentais, indicando misturas otimizadas com máximo empacotamento em cada consideração.

As composições obtidas por meio do modelo de empacotamento variaram, principalmente quando analisado os diferentes valores do coeficiente de distribuição, acarretando em um aumento do teor de materiais finos com a redução do valor deste coeficiente, ou seja, houve um ajuste da curva na parte da fração mais fina.

Em relação às composições obtidas para um mesmo valor de coeficiente de distribuição, a variação da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas praticamente não alterou a composição das misturas de concreto para $q = 0,32$, indicando que pode ser usada a razão de 2 para a formulação desses concretos pelo empacotamento de partículas. Já para $q = 0,26$, houve uma alteração considerável nas composições obtidas, sendo aconselhável a utilização da razão $\sqrt{2}$ e/ou $\sqrt[4]{2}$ para a definição da composição destes concretos.

Analisando o consumo de cimento, observou-se que o consumo deste material aumentou com a redução do valor do coeficiente de distribuição. Já para um mesmo coeficiente de distribuição, variando a razão entre as aberturas de peneiras sucessivas, houve um



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

aumento do consumo de cimento com a redução da razão entre as aberturas de peneiras sucessivas para as misturas de concreto com $q = 0,32$, enquanto que para as misturas formuladas com $q = 0,26$ o consumo de cimento praticamente não alterou ao reduzir a razão entre as peneiras. Comparando os diferentes valores do coeficiente de distribuição por meio de análise estatística (teste t de Student), verifica-se uma diferença significativa no consumo de cimento das composições formuladas.

Vale destacar que é fundamental a validação experimental das composições obtidas, a fim de verificar a influência do empacotamento de partículas no comportamento dos concretos, a partir da determinação de suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Esta etapa experimental estava prevista no projeto de pesquisa, mas foi prejudicada pela pandemia da COVID-19, uma vez que os laboratórios foram fechados, impedindo a conclusão das moldagens e a realização dos ensaios. Assim, em momento oportuno, quando da retomada das atividades presenciais na universidade, as composições obtidas pela simulação serão validadas experimentalmente

5 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro. 2009a.

_____. **NBR NM 53: Agregados – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro. 2009b.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro. 2019.

_____. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro. 2018.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. New York: Springer Science Business Media, 1994. 764p.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2019. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2019.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224p.

VANDERLEI, R.D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.