

## **Produção de concretos convencionais sustentáveis a partir do conceito de empacotamento de partículas**

*Production of sustainable ordinary concretes from the particle packing concept*

Alessandra Lorenzetti de Castro (1); Herbert Medeiros Torres Lopes (2); Maria Luisa dos Santos Vasconcellos (3); Lucas Modotte Bernardo (3)

(1) Professora Doutora, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo (EESC/USP) – [alcastro@sc.usp.br](mailto:alcastro@sc.usp.br)

(2) Mestre, Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC/USP

(3) Graduandos em Engenharia Civil, EESC/USP

Av. Trabalhador Sancarlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil

### **Resumo**

Com o propósito de abranger a prática da produção de concretos convencionais aplicados na construção civil, diversos métodos de dosagem consagrados estão disponíveis na literatura. Entretanto, pesquisas estão sendo desenvolvidas em busca de concretos com desempenho superior associado à redução do consumo de cimento, aplicando-se o conceito de empacotamento de partículas. O conceito consiste em uma maneira promissora de otimizar a composição de misturas de concreto utilizando partículas de diferentes tamanhos que resultem na maior densidade de empacotamento e, assim, em um material mais denso e compacto. Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar o comportamento de concretos convencionais dosados com base no conceito de empacotamento de partículas com vistas à sustentabilidade. Tendo como base traços de concreto convencional dosados por uma metodologia tradicional, as misturas foram otimizadas aplicando-se o modelo de empacotamento de Alfred. A fim de considerar o efeito da morfologia das partículas sobre a eficiência de empacotamento das misturas, foram considerados diferentes tipos de materiais como agregados. Assim, avaliou-se comparativamente o comportamento dos concretos produzidos, além do índice de intensidade de ligantes para avaliar o desempenho ambiental de cada concreto. No estado fresco, a aplicação do conceito de empacotamento na otimização das misturas implicou na redução da sua trabalhabilidade, demandando maiores teores de aditivo para se obter a consistência adequada. Os concretos otimizados apresentaram propriedades mecânicas superiores aos concretos de referência, com menor consumo de cimento, indicando uma maior sustentabilidade destes concretos.

*Palavra-Chave: Concreto; Dosagem; Empacotamento de partículas; Resistência à compressão; Sustentabilidade.*

### **Abstract**

In order to cover the practice of producing ordinary concretes applied in civil construction, several established mix design methods are available in the literature. However, research is being carried out in search of concretes with superior performance associated with the reduction of cement consumption, applying the particle packing concept. The concept consists of a promising way to optimize the composition of concrete mixtures using particles of different sizes that result in the highest packing density and, so, in a denser and more compact material. In this context, the present study seeks to evaluate the behavior of ordinary concretes designed based on the particle packing concept for sustainability. Based on mixes design of ordinary concretes designed by a traditional methodology, the mixtures were optimized by applying the Alfred's packing model. In order to consider the effect of the particle morphology on the packing efficiency of the mixtures, different types of materials were considered as aggregates. Thus, the behavior of the produced concretes was evaluated comparatively, in addition to the binder intensity index to assess the environmental performance of each concrete. In the fresh state, the application of the packing concept in the optimization of the mixtures implied in the reduction of their workability, demanding higher admixture content to obtain the adequate consistency. The optimized concretes showed mechanical properties superior to the reference concretes, with lower cement consumption, indicating a greater sustainability of these concretes.

*Keywords: Concrete; Mix design; Particle packing; Compressive strength; Sustainability.*

## 1 Introdução

O concreto armado é o material de construção mais empregado em obras civis no Brasil. Todo esse sucesso faz com que novas técnicas de preparação de materiais à base de cimento Portland, que se tornem uma alternativa vantajosa a esse tipo de construção, são de grande interesse para o desenvolvimento tecnológico das construções. Ao longo dos anos, inovações têm sido feitas na tecnologia dos concretos de cimento Portland. Porém, a sustentabilidade e a produtividade são os parâmetros chave para que novas inovações ainda sejam efetuadas no campo desses materiais (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008). Os concretos modernos têm sido desenvolvidos para a obtenção de materiais com desempenho mecânico e durabilidade superiores. Para tanto, concretos obtidos a partir do conhecimento da engenharia de microestrutura de materiais são necessários: por serem compósitos constituídos de partículas com granulometria fina e baixa relação água/cimento, os materiais apresentam matrizes densas obtidas a partir da aplicação dos conceitos de dispersão e empacotamento de partículas.

Particularmente para o conceito de empacotamento das partículas, o interesse aumentou nos últimos anos nas diferentes áreas da engenharia, uma vez que grande parte dos materiais 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. Dessa maneira, 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). Assim, 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. Dentre essas propriedades, destaca-se a morfologia das partículas.

De uma forma geral, no caso de partículas esféricas, o empacotamento aleatório de monodispersões resulta sempre em um mesmo fator de empacotamento. No entanto, à medida que o formato das partículas se distancia de uma esfera, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha (Figura 1), pois se verifica o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies irregulares. Quanto maior a concentração de partículas irregulares, a estrutura de empacotamento é destruída e ocorre a diminuição da densidade, resultando em um maior índice de vazios e, conseqüentemente, em uma maior porosidade (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004). De acordo com Oliveira *et al.* (2000), não há na literatura regras que definam quantitativamente o efeito da morfologia das partículas sobre a densidade de empacotamento com exatidão, sendo esse efeito avaliado apenas qualitativamente.

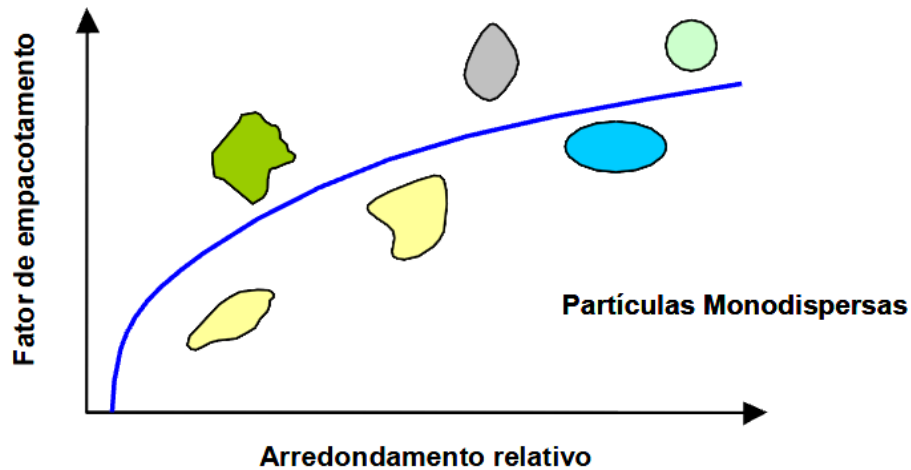


Figura 1 – Relação qualitativa entre densidade e arredondamento relativos para empacotamento de partículas de monodispersões aleatórias (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Sabe-se que a forma das partículas dos materiais granulares que comumente compõem as misturas de concreto de cimento Portland aplicadas na construção civil está distante de uma esfera. Além disso, deve-se admitir que, tradicionalmente na tecnologia dos concretos, pouca atenção é dada à busca por uma distribuição granulométrica ótima dessas partículas. Dependendo das condições prévias de exposição da rocha matriz e dos fatores relacionados com o processo de fabricação dos agregados para produção de concreto, é possível obter desde partículas arredondas até partículas achatadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A influência da morfologia das partículas sobre a eficiência de empacotamento de um sistema de partículas é ainda mais evidente quando se considera as partículas com menor dimensão devido à sua maior área superficial específica. Com a percepção atual pela necessidade de otimizar a composição dos concretos de uma maneira sustentável, a areia natural proveniente de rio ou de cava tem sido substituída pela areia artificial para a produção de concretos. Ao contrário da areia natural que é composta por partículas arredondadas, essa areia pode possuir partículas com forma mais angulosa ou alongada, distante de uma esfera, e seu uso pode implicar em alterações da densidade de empacotamento das partículas de materiais granulares que compõem as misturas de concreto.

Assim, o presente trabalho busca avaliar o comportamento de concretos convencionais otimizados com base no conceito de empacotamento de partículas com vistas à sustentabilidade na sua produção. Tendo como base traços de concreto convencional dosados por uma metodologia tradicional, as misturas foram otimizadas aplicando-se o modelo de empacotamento de Alfred (Equação 1) (FUNK; DINGER, 1994). A fim de considerar o efeito da morfologia das partículas sobre a eficiência do empacotamento das misturas, foram considerados diferentes tipos de materiais como agregados: areia natural, areia artificial, pedra britada de origens basáltica e granítica. O comportamento dos concretos produzidos foram avaliados de maneira comparativa, sendo verificadas propriedades no estado fresco e endurecido, bem como o índice de intensidade de ligante para avaliar seu desempenho ambiental (Equação 2).

$$CPFT(\%) = \left( \frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D,  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula da distribuição,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula na distribuição, e q é uma constante, designada por coeficiente ou módulo de distribuição.

$$I_L = \frac{C}{R_c} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:  $I_L$  é o índice de intensidade de ligante, C é a quantidade de ligante por metro cúbico de concreto, e  $R_c$  é a resistência à compressão do concreto. Dessa forma, o índice de intensidade de ligante pode ser definido como a quantidade de ligante por metro cúbico de concreto necessária para fornecer 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) (DAMINELI *et al.*, 2010). Ressalta-se que  $R_c$  pode assumir duas definições que influenciam o significado de  $I_L$ : quando  $R_c$  é tomada como a resistência à compressão axial média,  $I_L$  mede a eficiência da formulação e a qualidade dos materiais; ao assumir  $R_c$  como a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ),  $I_L$  mede simultaneamente a eficiência do produto e a variabilidade do processo, sendo bastante utilizado pelas empresas fornecedoras de concreto usinado para avaliar a eficiência do seu produto (JOHN, 2011). Assim, como este indicador utiliza parâmetros convencionais de dosagem, seu cálculo é rápido e fácil, facilitando sua difusão no mercado. Além disso, o índice de intensidade de ligante viabiliza uma comparação rápida e objetiva entre diferentes concretos: quanto maior  $I_L$ , maior é a quantidade de ligantes necessária para o mesmo desempenho mecânico e, portanto, menos sustentável e eficiente é o concreto.

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos concretos de referência e otimizados pelo empacotamento de partículas foram o cimento Portland composto com pozolana (CPII Z 32); duas areias naturais de origem quartzosa, classificadas como areia fina e areia média; três britas de origem basáltica, comercialmente identificadas como brita 1, brita 0 e pedrisco. Para avaliar o efeito da morfologia das partículas sobre a eficiência do empacotamento das misturas, foram consideradas também uma areia artificial e duas britas de origem granítica (brita 1 e brita 0). As características dos materiais granulares considerados para a produção dos concretos são apresentadas na Tabela 1, e as curvas da distribuição granulométrica discreta de cada um deles são apresentadas na Figura 2. Em todas as concretagens foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local. Como a quantidade de água foi mantida constante, para se alcançar a consistência desejada foi empregado aditivo plastificante na produção dos concretos.

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

Material		Propriedades			
Nomenclatura adotada	Classificação NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Diâmetro máximo característico (mm)	Módulo de finura
Brita 1 - Basalto (B1B)	9,5/25	2,96	---	19	6,60
Brita 1 - Granito (B1G)	9,5/25	2,65	---	19	6,94
Brita 0 - Basalto (B0B)	4,75/12,5	2,99	---	9,50	5,90
Brita 0 - Granito (B0G)	4,75/12,5	2,64	---	12,5	6,12
Pedrisco - Basalto (PB)	4,75/12,5	2,84	---	6,30	3,40
Areia artificial (AA)	---	2,82	---	4,75	4,52
Areia média (AM)	---	2,57	---	2,36	2,40
Areia fina (AF)	---	2,58	---	0,60	1,20
Cimento (CP)	---	3,05	3960	d <sub>50</sub> = 17 µm	---

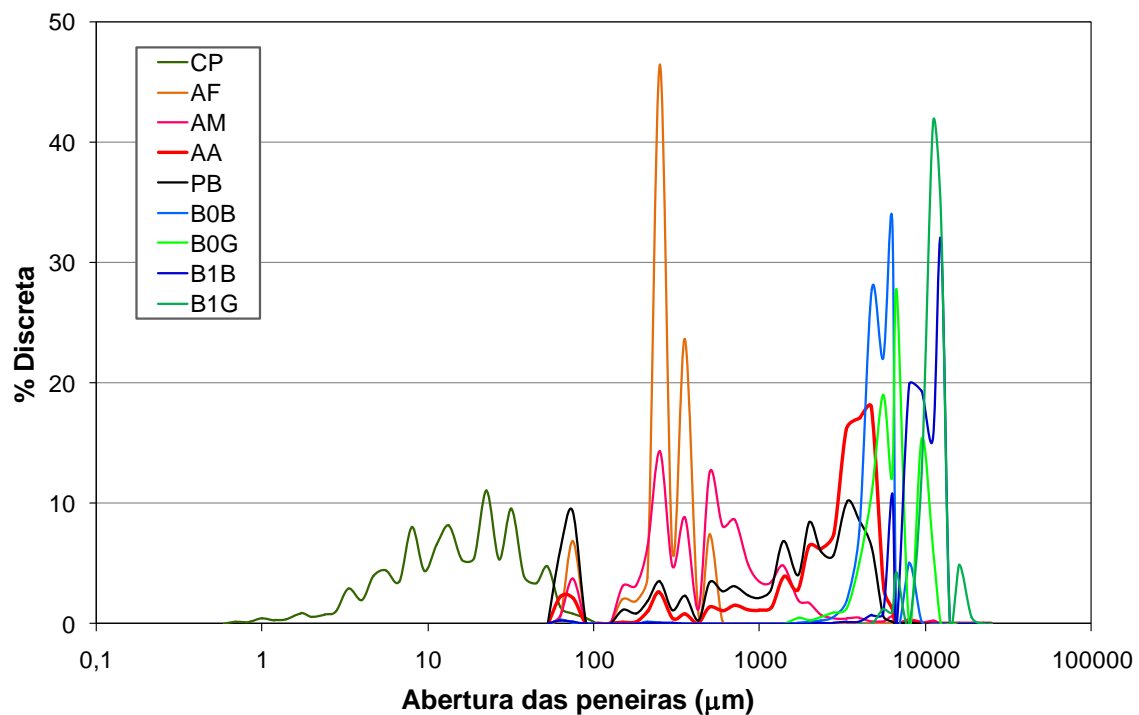


Figura 2 – Distribuição granulométrica dos materiais granulares constituintes das misturas de concreto.

## 2.2 Método de dosagem dos concretos otimizados

Tendo como base dois traços de concreto convencional – C25 e C40 – dosados pelo método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), as misturas foram otimizadas aplicando-

se o modelo de empacotamento de Alfred. O coeficiente de distribuição considerado na otimização de cada um dos conjuntos de concreto foi definido a partir do ajuste entre a curva de distribuição do traço de referência (curva experimental) e a curva teórica do modelo de Alfred, sendo o valor determinado por meio de um processo iterativo que busca maximizar o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre as duas curvas.

Assim, na dosagem dos concretos otimizados foram mantidos os mesmos coeficientes de distribuição obtidos nos traços de referência. Para cada uma das classes de resistência do concreto foram produzidas quatro misturas: o concreto de referência (REF), dosado pela metodologia tradicional; o concreto otimizado considerando as areias naturais e as britas de origem basáltica como agregados miúdo e graúdo, respectivamente, identificado por COT-1; o concreto otimizado considerando também a areia artificial como agregado miúdo, além das britas de origem basáltica como agregado graúdo, identificado por COT-2; e o concreto otimizado considerando as areias naturais e as britas de origem granítica como agregados miúdo e graúdo, respectivamente, identificado por COT-3. A composição das misturas foi definida pela combinação entre os materiais granulares que resultaram na porcentagem, em massa, de cada componente que propiciou o máximo coeficiente de correlação entre a curva de distribuição teórica do modelo de empacotamento e a curva de distribuição experimental idealizada para o traço de concreto.

Ao realizar a otimização das misturas, para a produção dos concretos, o teor de água/materiais secos foi mantido constante, possibilitando a determinação da relação água/cimento de cada um dos concretos. Foi adotado o valor de 8,5% para o teor de água/materiais secos para ambos os conjuntos de concreto, uma vez que este valor é normalmente considerado para a composição de concretos convencionais amplamente aplicados na construção civil. Como a quantidade de água foi mantida constante, o abatimento especificado para todas as misturas –  $(120 \pm 20)$  mm – foi obtido pelo ajuste do teor de aditivo plastificante.

## 2.3 Procedimento de mistura, moldagem e cura dos concretos

A produção das misturas de concreto foi executada em uma betoneira de eixo inclinado. O procedimento de mistura obedeceu a seguinte ordem: inicialmente 70% da água de amassamento foi misturada com os agregados miúdo e graúdo por 1 minuto; em seguida, o cimento e o restante da água foram adicionados e a mistura homogeneizada por 5 minutos; então, o aditivo plastificante foi incorporado à mistura, que prosseguiu por mais 5 minutos, garantindo a completa homogeneização do material, sendo o teor de aditivo de cada mistura ajustado para a obtenção do abatimento especificado.

Para a avaliação das propriedades dos concretos no estado endurecido, foram moldados corpos de prova, adensados com auxílio de uma mesa vibratória, que foram protegidos para evitar a perda de umidade do concreto. Depois de 24 horas, os corpos de provas foram desmoldados e submetidos a um regime contínuo de cura úmida até as respectivas idades de ensaio.

## 2.4 Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido

As propriedades dos concretos de referência e dos concretos otimizados com base no empacotamento de partículas foram avaliadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, avaliando comparativamente o comportamento dos concretos produzidos e a influência da morfologia das partículas dos diferentes agregados miúdo e graúdo sobre a eficiência de empacotamento das misturas.

No estado fresco foram avaliadas a consistência por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (ABNT, 1998) e a massa específica (ABNT, 2008). No estado endurecido foi determinada a resistência à compressão dos concretos nas idades de 7, 28 e 91 dias, conforme a NBR 5739:2018 (ABNT, 2018), sendo moldados três corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada idade analisada. Para o resultado final de cada ensaio mecânico foi considerada a média referente aos resultados individuais obtidos nos corpos de prova, assim como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

Além disso, foi realizada a estimativa do desempenho ambiental das misturas de concreto produzidas por meio do cálculo do índice de intensidade de ligantes, que possibilita a comparação entre os concretos de referência e os concretos otimizados, a fim de verificar se uma possível redução do consumo de cimento obtida pelo empacotamento de partículas reflete em uma maior sustentabilidade para o material e, assim, viabilizando o uso dos concretos otimizados.

## 3 Resultados e discussões

### 3.1 Dosagem dos concretos de referência e otimizados

Os concretos convencionais de referência (REF) foram obtidos pelo método de dosagem IPT/EPUSP, fixando-se o teor ideal de argamassa em 53%, teor de água/materiais secos em 8,5% e um abatimento de  $(120 \pm 20)$  mm. Os traços, em massa, adotados para estes concretos foram 1 : 2,60 : 3,20 : 0,58 e 1 : 1,65 : 2,35 : 0,43 para os concretos C25 e C40, respectivamente, sendo o agregado miúdo composto por 60% de areia média e 40% de areia fina em ambos os traços. Como a quantidade de água foi mantida constante, o abatimento especificado foi alcançado ajustando-se o teor de aditivo plastificante.

A otimização dos concretos com base no conceito de empacotamento de partículas foi realizada aplicando-se o modelo de Alfred. Para isso, inicialmente, foi determinado o coeficiente de distribuição dos concretos de referência, considerando a distribuição granulométrica discreta e as proporções dos materiais constituintes dos traços. Para cada concreto de referência foi obtida a curva de distribuição granulométrica experimental da mistura e, aplicando-se o modelo de empacotamento de Alfred, obteve-se a curva teórica. Por meio de um processo iterativo para ajustar a curva teórica à curva experimental, buscando obter o máximo coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre elas, foi determinado o coeficiente de distribuição das misturas de referência, sendo obtidos os valores de 0,27 ( $R^2 = 0,962$ ) e 0,23 ( $R^2 = 0,959$ ) para os concretos C25 e C40, respectivamente. Detalhes da determinação dos coeficientes de distribuição estão disponíveis em Lopes (2019).

As composições dos concretos otimizados (COT-1, COT-2 e COT-3) foram determinadas por meio de um processo de otimização matemática, que utilizou como dados de entrada a distribuição granulométrica discreta dos materiais constituintes da mistura e o valor do coeficiente de distribuição determinado para os concretos de referência. De maneira iterativa, o programa calcula o diâmetro da menor e da maior partícula presente na mistura, fornecendo a curva de distribuição granulométrica teórica do modelo de empacotamento adotado (modelo de Alfred). Simultaneamente, o teor de cada material é ajustado a fim de obter o máximo coeficiente de correlação entre as curvas teórica e experimental. Ao final do processo, a composição do concreto otimizado é dada em termos de porcentagem, em massa, de cada material granular constituinte da mistura.

A composição (% em massa) e o consumo dos materiais constituintes das misturas de concretos produzidos (referência e otimizados) são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Lenz (2016) observou que em concretos com esqueleto granular modificado, otimizados a partir do conceito de empacotamento de partículas, demandam maiores quantidades de agregados em relação ao concreto de referência, tendência seguida pelos concretos produzidos no presente estudo. A incorporação de novos materiais (brita 0 e pedrisco) associados com a areia média proporcionou um melhor empacotamento da mistura, levando à exclusão da areia fina na composição dos concretos otimizados. Isso aconteceu porque a combinação da areia média com o pedrisco compõe uma mistura com partículas na faixa de 100 a 1000  $\mu\text{m}$ , sobrepondo a faixa granulométrica da areia fina e, assim, eliminando-a da composição dos traços otimizados. Além disso, o teor de cimento também foi alterado com a otimização dos concretos a partir do empacotamento de partículas: enquanto no concreto C25 houve um aumento no consumo de cimento de até cerca de 10%, no C40 o consumo de cimento foi reduzido em até cerca de 7,5%.

Tabela 2 – Composição e consumo de materiais constituintes das misturas de concreto C25 ( $q = 0,27$ ).

Traço de concreto	C25-REF		C25-COT-1		C25-COT-2		C25-COT-3	
Materiais constituintes	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 1 - Basalto (B1B)	47,06	1050	16,84	388	16,61	386	---	---
Brita 1 - Granito (B1G)	---	---	---	---	---	---	16,61	359
Brita 0 - Basalto (B0B)	---	---	7,73	178	11,00	256	---	---
Brita 0 - Granito (B0G)	---	---	---	---	---	---	11,00	238
Pedrisco - Basalto (PB)	---	---	41,73	961	---	---	39,37	852
Areia artificial (AA)	---	---	---	---	39,37	915	---	---
Areia média (AM)	22,94	512	17,85	411	17,48	406	17,48	378
Areia fina (AF)	15,30	341	---	---	---	---	---	---
Cimento (CP)	14,70	328	15,84	365	15,54	361	15,54	336
Água	---	190	---	196	---	198	---	184
Plastificante	---	0,79	---	4,38	---	3,61	---	3,70

Tabela 3 – Composição e consumo de materiais constituintes das misturas de concreto C40 (q = 0,23).

Traço de concreto	C40-REF		C40-COT-1		C40-COT-2		C40-COT-3	
Materiais constituintes	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	%, em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 1 - Basalto (B1B)	47,00	1059	15,30	354	14,93	344	---	---
Brita 1 - Granito (B1G)	---	---	---	---	---	---	14,93	327
Brita 0 - Basalto (B0B)	---	---	6,95	161	9,94	229	---	---
Brita 0 - Granito (B0G)	---	---	---	---	---	---	9,94	218
Pedrisco - Basalto (PB)	---	---	39,50	914	---	---	37,04	812
Areia artificial (AA)	---	---	---	---	37,04	853	---	---
Areia média (AM)	19,80	446	19,24	445	19,06	439	19,06	418
Areia fina (AF)	13,20	297	---	---	---	---	---	---
Cimento (CP)	20,00	451	19,01	440	19,03	438	19,03	417
Água	---	192	---	197	---	196	---	186
Plastificante	---	1,22	---	5,28	---	5,48	---	0,00

### 3.2 Avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco

As propriedades dos concretos de referência e otimizados com base no empacotamento de partículas foram avaliadas por meio da determinação da consistência pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (ABNT, 1998) e da massa específica (ABNT, 2008), sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Teor de aditivo das misturas e propriedades dos concretos produzidos no estado fresco.

Traço de concreto	Teor de aditivo (%) *	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)
C25-REF	0,24	2420,55	130
C25-COT-1	1,20	2498,50	25
C25-COT-2	1,00	2522,10	65
C25-COT-3	1,10	2346,84	185
C40-REF	0,27	2445,25	125
C40-COT-1	1,20	2510,95	20
C40-COT-2	1,25	2497,46	55
C40-COT-3	0,00	2377,20	145

NOTA: \* Teor de aditivo plastificante em relação à massa de cimento (% , em massa).

No estado fresco verificou-se uma perda sistemática da trabalhabilidade das misturas otimizadas em relação às misturas de referência, sendo necessário aumentar o teor de

aditivo plastificante para se atingir a consistência inicialmente estabelecida. Ainda assim, mesmo com um aumento substancial da quantidade de aditivo, não foi possível atingir a faixa de abatimento estabelecida com as misturas COT-1 e COT-2, independente da classe de resistência considerada. Nestes concretos – C25-COT-1, C25-COT-2, C40-COT-1 e C40-COT-2 – mesmo não atingindo a faixa de abatimento estabelecida, não foi incorporado mais aditivo plastificante às misturas pois foram observados os fenômenos de segregação e exsudação a partir da análise visual desses concretos, limitando o teor de aditivo nas porcentagens informadas na Tabela 4. No entanto, quando do adensamento mecânico das misturas para a moldagem dos corpos de prova, não houve prejuízo da compactação dos concretos. Vale salientar que o alto teor de aditivo plastificante retardou o tempo de pega dos concretos otimizados em dois dias, não sendo recomendado o uso deste tipo de aditivo para a produção de concretos com alto teor de finos, que é o caso dos concretos otimizados com base no conceito de empacotamento de partículas, produzidos e avaliados no presente estudo.

Como a diferença da quantidade de cimento em cada conjunto de resistência (C25 e C40) foi pequena, a perda da trabalhabilidade dessas misturas está relacionada principalmente com o aumento da quantidade de finos presentes na areia artificial e no pedrisco, materiais constituintes incorporados às misturas quando da otimização pelo conceito de empacotamento de partículas. Além disso, como esses dois agregados são de origem basáltica, suas partículas tendem a ser mais lamelares, o que dificulta a mobilidade relativa entre elas, reduzindo a fluidez do concreto (REBMANN, 2016). Por outro lado, ao considerar agregados graúdos de origem granítica na otimização dos concretos, foi possível atingir a consistência desejada com o ajuste do teor de aditivo, mesmo com o aumento do teor de finos pela incorporação do pedrisco de origem basáltica. Vale destacar que na mistura C40-COT-3 a consistência adequada foi obtida sem a incorporação de aditivo químico. Nas misturas C25-COT-3 e C40-COT-3 este comportamento foi devido à influência da forma do agregado graúdo de origem granítica, ligeiramente mais arredondado que o de origem basáltica utilizado na produção dos outros concretos, tendo um menor impacto na mobilidade entre as partículas e, conseqüentemente, na fluidez do concreto.

Com relação à massa específica dos concretos, os resultados (Tabela 4) demonstraram que os valores obtidos variaram entre 2346 e 2522 kg/m<sup>3</sup>, conforme esperado para esses tipos concretos. As misturas otimizadas com base no conceito de empacotamento de partículas geralmente apresentaram massa específica superior à dos concretos de referência, com exceção das misturas otimizadas com agregado graúdo de origem granítica (C25-COT-3 e C40-COT-3) devido à menor massa específica deste agregado (2,65 g/cm<sup>3</sup>) em relação ao agregado de origem basáltica (aproximadamente 3,00 g/cm<sup>3</sup>).

### 3.3 Avaliação da resistência mecânica dos concretos

No estado endurecido, foi avaliado o comportamento mecânico dos concretos produzidos, a partir da determinação da resistência à compressão (ABNT, 2018). Os resultados dos ensaios, realizados nas idades de 7, 28 e 91 dias, são apresentados nas Tabelas 5 e 6, e correspondem à média dos três corpos de prova ensaiados em cada uma das idades. Além do valor médio da resistência, são apresentados o desvio-padrão e o coeficiente de

variação dos resultados. A evolução da resistência média à compressão ao longo do tempo, para os concretos C25 e C40, é apresentada nas Figuras 3 e 4, respectivamente. A aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização dos concretos resultou no aumento da resistência à compressão em todas as misturas produzidas, para todas as idades avaliadas. Nas primeiras idades (7 dias), é evidenciado um acréscimo de resistência menor em relação às idades posteriores (28 e 91 dias), o que pode ser atribuído à menor quantidade de agregado graúdo utilizada nas misturas otimizadas quando comparada às misturas de referência. Esse material favorece o desempenho mecânico nas primeiras idades, enquanto nas idades mais avançadas há contribuição do empacotamento de partículas e da matriz da pasta de cimento hidratada. Em relação aos valores individuais, no geral, observa-se uma baixa dispersão dos resultados, o que mostra uma boa homogeneidade das amostras. Em casos isolados, particularmente para os concretos otimizados de classe C25 (C25-COT-1 e 25-COT-3), foram obtidos coeficientes de variação superiores a 10%.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para os concretos C25.

Traço de concreto	C25-REF			C25-COT-1			C25-COT-2			C25-COT-3		
	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV
Idade (dias)												
7	22,8	2,2	9,7	30,8	3,1	10,2	26,3	2,5	9,5	25,3	4,6	18,2
28	27,8	1,9	7,0	39,4	1,3	3,4	46,1	2,9	6,4	39,5	2,8	7,1
91	35,7	1,9	5,2	44,4	6,1	13,8	56,4	1,3	2,3	47,6	6,0	12,6

NOTAS: f<sub>cj</sub> = resistência média à compressão, aos j dias de idade, em MPa; DP = desvio-padrão, em MPa; CV = coeficiente de variação, em %.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para os concretos C40.

Traço de concreto	C40-REF			C40-COT-1			C40-COT-2			C40-COT-3		
	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV	f <sub>cj</sub>	DP	CV
Idade (dias)												
7	31,9	2,3	7,3	35,9	2,3	6,3	25,9	2,7	11,0	30,3	1,1	3,5
28	40,2	1,7	4,1	43,1	3,2	7,4	51,5	5,6	10,9	50,9	1,0	2,0
91	47,0	0,2	0,5	61,2	3,1	5,0	56,8	8,4	14,9	55,5	4,1	7,3

NOTAS: f<sub>cj</sub> = resistência média à compressão, aos j dias de idade, em MPa; DP = desvio-padrão, em MPa; CV = coeficiente de variação, em %.

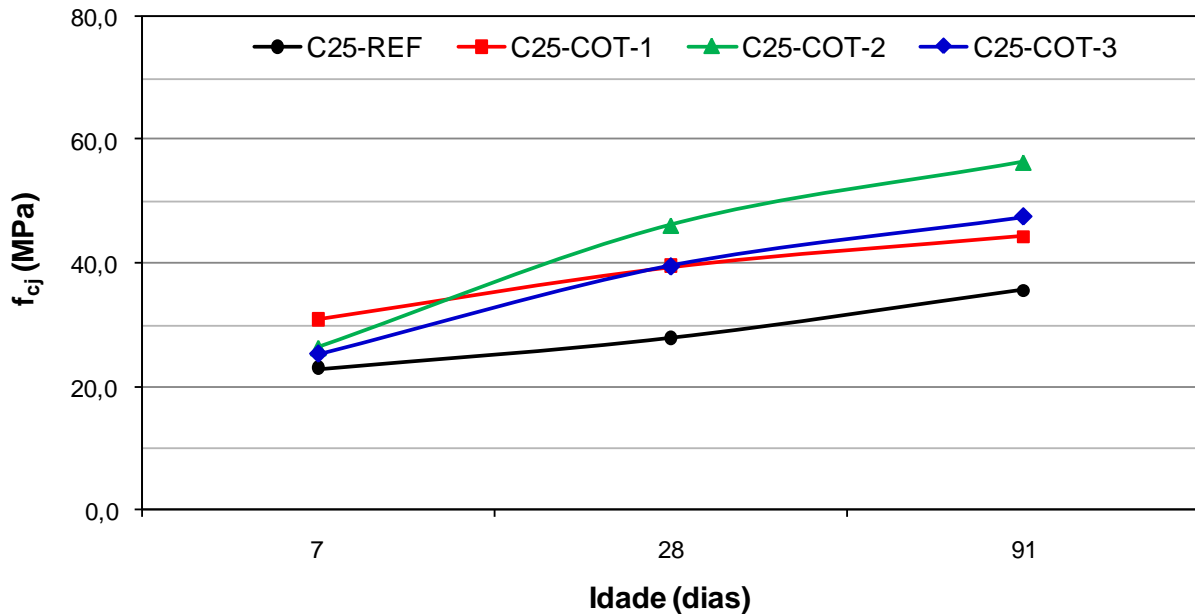


Figura 3 – Evolução da resistência à compressão dos concretos C25 ao longo do tempo.

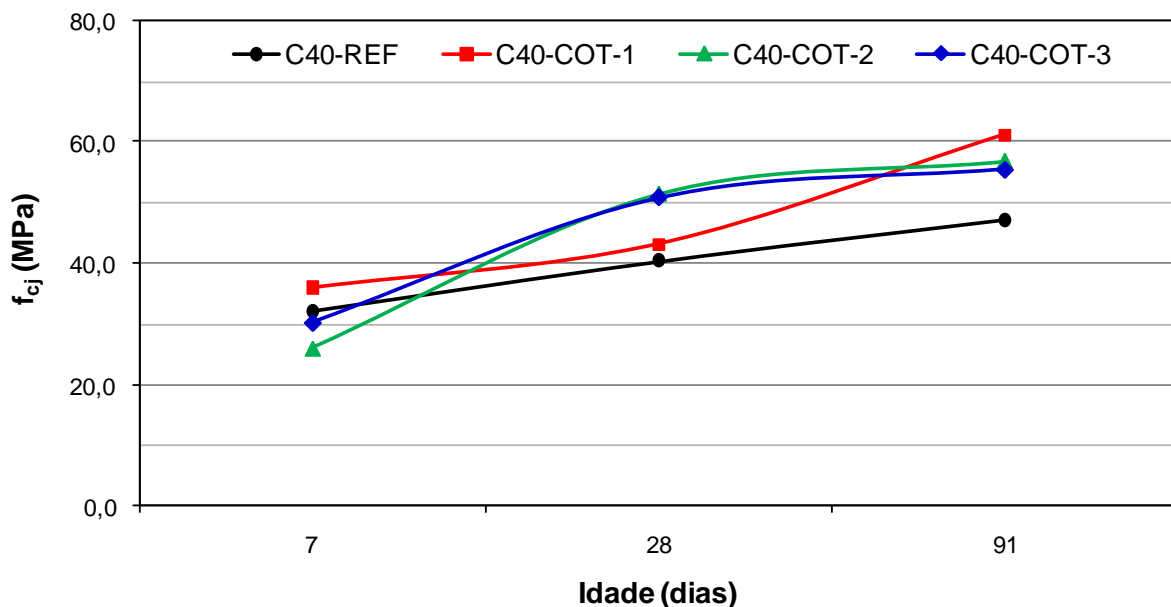


Figura 4 – Evolução da resistência à compressão dos concretos C40 ao longo do tempo.

Vale ressaltar que na otimização dos concretos foi mantido o mesmo valor do coeficiente de distribuição determinado para os traços de referência, a fim de verificar, de maneira comparativa, a influência da aplicação do conceito de empacotamento de partículas no comportamento dos concretos. Como os valores obtidos são inferiores ao valor de 0,30 normalmente recomendado para concretos adensados sob vibração (VANDERLEI, 2004), e como o efeito da redução do valor do coeficiente de distribuição se dá no aumento da

quantidade de finos, a maior densidade de empacotamento obtida para os concretos otimizados resultou em maiores valores de resistência à compressão. Isto indica que em um estudo de dosagem de concreto a partir do conceito de empacotamento de partículas, ao fixar o valor do coeficiente de distribuição de acordo com a consistência desejada, é possível que se obtenha misturas com traços otimizados e adequados para a classe de resistência especificada, com consumo de cimento reduzido.

Ao analisar a influência do tipo de agregado miúdo e graúdo considerado na otimização dos concretos, verificou-se que em termos de valores de resistência média à compressão ( $f_{cj}$ ), o C25-COT-2 apresentou o melhor desempenho mecânico, enquanto o C25-COT-3 apresentou um comportamento mecânico semelhante ao C25-COT-1 ao longo do tempo. No conjunto de concreto classe C40, o ganho e a evolução da resistência à compressão foram diferentes: o comportamento mecânico dos concretos C40-COT-2 e C40-COT-3 foram semelhantes ao longo do tempo, mas quando comparados com o C40-COT-1, estes concretos apresentaram maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias, enquanto que para a idade de 91 dias apresentaram menores valores de resistência mecânica. No entanto, vale ressaltar que a incorporação de areia artificial (COT-2) ou de agregado graúdo de origem granítica (COT-3) não teve influência significativa na resistência à compressão dos concretos quando comparado ao concreto otimizado considerando agregado miúdo natural e agregado graúdo de origem basáltica (COT-1), independente da classe de resistência considerada.

### 3.4 Sustentabilidade dos concretos

Como a otimização da dosagem de concreto por meio do conceito de empacotamento de partículas modifica parâmetros pré-estabelecidos para a composição das misturas, a análise das propriedades mecânicas isoladamente não é suficiente para avaliar o desempenho ambiental dos materiais, sendo necessário utilizar o parâmetro relacionado com a eficiência no uso dos ligantes. No presente estudo, foi considerado o índice de intensidade de ligante ( $I_L$ ), em que o consumo de ligantes está relacionado com o consumo de cimento das misturas de concreto produzidas (referência e otimizados), conforme apresentado na Tabela 7. Os valores do índice de intensidade de ligante foram calculados para as idades de 28 e 91 dias.

Damineli (2013) indica que no mercado brasileiro os concretos dosados em central com resistência à compressão abaixo de 40 MPa possuem índice de intensidade de ligante entre 7 e 14  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para a idade de referência de 28 dias. Com base nos valores de  $I_L$  apresentados na Tabela 7, é possível constatar que os traços de concretos produzidos e avaliados no presente estudo (referência e otimizados) se enquadram dentro desse intervalo, independente da classe de resistência do concreto e do tipo de agregados miúdo e graúdo considerados na otimização dos mesmos. Além disso, verifica-se uma redução do  $I_L$  para todas as misturas dos 28 para os 91 dias de idade, devido ao ganho de resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo. Comportamento semelhante foi verificado por Lopes, Peçanha e Castro (2020).

Os resultados de índice de intensidade de ligante para os concretos otimizados com base no conceito de empacotamento de partículas apresentaram menores valores de  $I_L$  quando comparados aos concretos dosados pela metodologia de dosagem tradicional (concretos

de referência), contribuindo para a obtenção de concretos mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, visto que a produção de cimento é responsável por emissões significativas de gases de efeito estufa. Essa maior eficiência ambiental corrobora o potencial das estratégias adotadas no presente estudo. Além disso, a estratégia de aplicar o conceito de empacotamento na dosagem de concretos de cimento Portland ajudaria a compensar a falta de ligantes e, ainda, atingir resistências elevadas.

Tabela 7 – Índice de intensidade de ligantes ( $I_L$ , em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) dos concretos produzidos.

Traço de concreto	28 dias	91 dias
C25-REF	11,82	9,19
C25-COT-1	9,27	8,22
C25-COT-2	7,84	6,40
C25-COT-3	8,51	7,06
C40-REF	11,20	9,59
C40-COT-1	10,20	7,18
C40-COT-2	8,51	7,71
C40-COT-3	8,19	7,51

Ao analisar a influência do tipo de agregado miúdo e graúdo considerado na otimização dos concretos, verificou-se que tanto o concreto otimizado considerando também a areia artificial como agregado miúdo (COT-2) quanto o concreto otimizado considerando as britas de origem granítica como agregado graúdo (COT-3) apresentaram menores índices de intensidade de ligante que os concretos otimizados considerando as areias naturais e as britas de origem basáltica como agregados miúdo e graúdo, respectivamente (COT-1), independente da classe de resistência considerada. No entanto, vale ressaltar que o tipo de agregado miúdo e graúdo não teve influência significativa no índice de intensidade de ligante dos concretos otimizados com base no conceito de empacotamento de partículas.

## 4 Conclusões

Tendo como base traços de concreto convencional dosados por metodologia tradicional, foram produzidas misturas otimizadas com base no conceito de empacotamento de partículas, sendo avaliado seu comportamento no estado fresco e endurecido.

Verificou-se que o processo de otimização dos traços de concreto resultou em misturas com maior quantidade de agregados. Ao incorporar novos materiais às misturas, alguns materiais constituintes considerados na mistura de referência foram excluídos quando do processo de otimização, dada a sobreposição de faixas granulométricas desses materiais. Além disso, houve alteração do teor de cimento com a otimização dos concretos a partir do conceito de empacotamento de partículas.

No estado fresco verificou-se uma perda sistemática da trabalhabilidade das misturas otimizadas em relação às misturas de referência, sendo necessário aumentar o teor de aditivo plastificante para se atingir a consistência inicialmente estabelecida. A perda da

trabalhabilidade das misturas de concreto otimizado está relacionada principalmente com o aumento da quantidade de finos presentes na areia artificial e no pedrisco, materiais constituintes incorporados às misturas quando do seu processo de otimização.

No estado endurecido, mantendo constante o coeficiente de distribuição, a aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização dos concretos resultou no aumento da resistência à compressão em todas as misturas produzidas, para todas as idades avaliadas. Quanto ao desempenho ambiental, dado os menores valores do índice de intensidade de ligante dos concretos otimizados, foi possível verificar a contribuição do empacotamento de partículas para a obtenção de concretos mais sustentáveis, corroborando com o potencial das estratégias de dosagem adotadas no presente estudo.

Por fim, quanto à influência da morfologia das partículas dos agregados miúdo e graúdo sobre a eficiência do empacotamento das misturas, verificou-se um maior impacto sobre a trabalhabilidade dos concretos otimizados do que sobre seu comportamento mecânico e desempenho ambiental. Embora se conheça a importância da morfologia das partículas na eficiência do empacotamento de uma mistura, a consideração deste fator é difícil de ser implementada, não sendo normalmente considerada na fundamentação matemática dos modelos de empacotamento disponíveis na literatura. O modelo de empacotamento de Alfred adotado considera na sua formulação partículas perfeitamente esféricas, desconsiderando a influência da morfologia das mesmas. Sendo assim, esta é uma das limitações do modelo teórico aplicado para obter a distribuição de partículas reais e, assim, dificultando avaliar quantitativamente o efeito da morfologia das partículas sobre a eficiência do empacotamento de um sistema de materiais granulares. No presente estudo não foi possível observar diferenças significativas na resistência à compressão e no índice de intensidade de ligantes ao variar o tipo de agregado miúdo e graúdo considerado na produção dos concretos otimizados, independente da classe de resistência considerada.

## 5 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado financiada, ao Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo (PUB-USP) pelas bolsas de Iniciação Científica financiadas, e às empresas Holcim Lafarge, GCP Applied Technologies, Bandeirantes e Polimix Agregados, pela doação dos materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

## 6 Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro/RJ, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro/RJ, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro/RJ, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro/RJ, 1998.



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



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

- 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.
- DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 237p. Tese (Doutorado em Ciências), Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2013.
- DAMINELI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- 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.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992. 349 p.
- JOHN, V. M. **Concreto sustentável**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1843-1869.
- LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento de partículas do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. 2016. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2016.
- 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.
- LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Matéria**, v. 25, n. 1, e-12549, 2020.
- MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751p.
- OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224p.
- REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. 252p. Tese (Doutorado em Ciências), Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.
- SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 128-136, 2008.
- SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. **Relações entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: alta alumina**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 47, João Pessoa/PB, 2003. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003.
- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.