



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS NA RESISTÊNCIA E NA POROSIDADE DE CONCRETOS

Henrique J. Raad^{1*}, Débora P. Lemos¹, Sérgio V. de Carvalho¹, Wendell W. S. da Silva¹,
Caio F. Silva¹, André L. S. V. P. Madureira¹, Leonardo V. C. Barbosa¹

1 - Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). Av. Dom José Gaspar, nº 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, CEP 30535-901, MG.

henriquejraad@gmail.com

RESUMO

Grande parte dos estudos sobre a tecnologia do concreto tem por objetivo o desenvolvimento de traços de mistura entre aglomerantes, agregados, adições e aditivos que permitam melhores desempenhos mecânicos e maior durabilidade, com destaque para as respostas de resistência à compressão e ainda a redução da permeabilidade. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da otimização do empacotamento dos grãos da fração de agregado miúdo em concreto de cimento portland com relação ao ganho de resistência à compressão a 28 dias e ainda a redução da porosidade total, propondo uma composição granulométrica em curva com alto preenchimento de vazios através de separação granulométrica no agregado miúdo utilizado. Para a avaliação, foi utilizado modelo de separação de frações granulométricas de agregado miúdo e partículas ultrafinas para, após a separação, constituir agregado miúdo com curva de elevado empacotamento. A porção de agregado miúdo com curva otimizada foi empregada na substituição integral de agregado miúdo em traço convencional, dosado pelo método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) para concreto convencional com resistência à compressão mínima de 20 MPa após 28 dias, sendo realizado estudo comparativo entre o traço convencional e o modificado. No modelo de estudo comparativo entre o concreto de traço convencional e o com a substituição da areia de granulometria comum por areia otimizada, foi realizado controle das principais variáveis de contorno de dosagem, entre elas os teores dos diversos insumos, a temperatura de moldagem, a reologia, entre outras, sendo a substituição entre os dois tipos de agregado a única alteração direta entre os traços comparados. A análise experimental para o estudo das propriedades do concreto com otimização da curva do agregado miúdo demonstrou que a otimização do empacotamento dos grãos interferiu diretamente no desempenho do concreto alterado nos parâmetros resistência à compressão e porosidade total quando comparado ao concreto convencional, com aumento na resistência à compressão a 28 dias superior a 135% do valor obtido no traço convencional. A porosidade total para os corpos de prova do traço otimizado apresentou valores inferiores aos do traço convencional, através de ensaio de absorção por imersão total. Desta forma, o estudo comprovou a eficácia do processo de otimização da curva granulométrica do agregado miúdo na mistura de concreto de cimento portland para aumento de resistência à compressão e de redução de porosidade.

Palavras-chave: Concreto, Empacotamento, Agregado Miúdo, Porosidade, Resistência.

INTRODUÇÃO

O concreto sempre foi alvo de pesquisas com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas, já que é um dos materiais mais utilizados na construção civil com ampla aplicação. Mistura composta por cimento, agregados graúdos, agregados miúdos e água, além de aditivos químicos e adições minerais, o concreto possui comportamentos distintos de acordo com as proporções e as características destes materiais que o constituem. Por ser um material heterogêneo e com partículas com diferentes características, composições, formas e tamanhos, diversas variáveis se sobrepõem nas interações internas, conferindo alta complexidade aos processos de previsibilidade de seus comportamentos.

Dentre estas variáveis, destaca-se como parâmetro notório de influência, tal qual ocorre com qualquer material constituído por aglomerações granulares, o empacotamento dos grãos.

Estudos sobre a reologia e o comportamento endurecido de concretos⁽¹⁾ indicam que a densidade de empacotamento possui forte influência nas propriedades mecânicas, como consequência do arranjo otimizado da macroestrutura do material. A otimização do empacotamento das partículas das misturas de concreto se dá, usualmente, pela seleção correta da proporção, da forma e do tamanho adequado dos materiais, de modo que as partículas menores preencham os vazios formados pelas partículas maiores, levando-se ainda em consideração a morfologia das partículas, a porosidade interna das partículas, a superfície total de grãos e os efeitos sobre a relação água/cimento e aspectos resultantes na reologia da mistura. Diante disto, este estudo teve como objetivo avaliar a influência da otimização do empacotamento dos grãos de mistura de concreto através de método de cálculo de proporções de frações granulométricas do agregado miúdo, verificando as alterações reológicas e de comportamento mecânico em comparação ao traço original antes da modificação.

REFERENCIAL TEÓRICO

A porosidade do concreto é representada pela parte do volume de uma amostra porosa, ocupada por poros ou espaços vazios⁽³⁾. A conexão dos vazios faz com que este se torne permeável à água. A permeabilidade torna o concreto suscetível às intempéries e a ação de agentes atmosféricos⁽⁴⁾. Dentre os fatores que influenciam na formação de poros dentro de um concreto se encontram o fator água cimento (relação a/c), o processo de cura utilizado e a dimensão dos agregados utilizados⁽²⁾. A otimização destes fatores possibilita a redução da porosidade total do material, podendo ainda ser alterada a condição de arranjo de grãos por efeito de melhoria da curva granulométrica e aplicação de cargas prévias de compactação no momento que antecede à cura inicial⁽⁵⁾, o que também resultará em redução do índice de poros.

O estudo da constituição da curva de granulometria tem por objetivo classificar os grãos segundo as suas dimensões⁽⁸⁾. A ABNT NBR 7211:2019 especifica método de classificação dos agregados a partir da sua composição granulométrica, em ensaio onde os agregados são peneirados em um conjunto de peneiras cuja abertura das malhas é determinada pela referida norma, ficando as malhas dispostas uma sobre a outra de forma que a peneira com menor malha fique na posição inferior. Segundo esta norma, considera-se como agregado miúdo a porção granular cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na abertura de malha 0,15 mm, e como agregados graúdos a porção dos grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm ficam retidos na peneira com 4,75 mm.

A finalidade da dosagem de um traço com empacotamento dos grãos é aumentar a densidade do material. Enquanto elemento estrutural de concreto armado, espera-se que um material mais denso tenha maior resistência à compressão. Os métodos de empacotamento são baseados no estudo e análise granulométrica das partículas, onde, para obtenção da diminuição dos espaços e lacunas entre grãos, é feito o preenchimento dos vazios deixados pelos grãos maiores com

partículas menores⁽⁵⁾. Dos diversos estudos de empacotamento desenvolvidos, destaca-se método que otimiza o encaixe geométrico granular, conforme a equação (A) a seguir:

$$CPFT = \left[\frac{(d^q - d_m^q)}{(D^q - d_m^q)} \right] \times 100 \quad (A)$$

Na equação (A), “CPFT” é o percentual acumulado de finos menor que “d” em volume, “d” é o tamanho da partícula, “*dm*” é o menor tamanho de partícula da distribuição, “D” é o maior tamanho de partícula da distribuição, e “q” é o coeficiente de distribuição.

Segundo a NBR 12655, há dois tipos de dosagem: a dosagem empírica e a dosagem experimental, este último estabelece o traço do concreto com a resistência e a trabalhabilidade previstas, pois o concreto e seus agregados são previamente ensaiados em laboratório. O cálculo do traço leva em consideração as características físicas e químicas dos constituintes, a resistência à compressão esperada, as condições de controle da mistura, dentre outros aspectos. No método de dosagem referido, consideram-se três tipos de controle de dosagem: Controle A (cimento e agregados medidos em massa, com margem de desvio de resistência “Sd” de 4,0 MPa), Controle B (cimento medido em massa, agregados medidos em massa ou volume sob condições específicas com Sd de 5,5 MPa) e Controle C (cimento medido em massa e agregados em volume, com Sd de 7,0 MPa). A utilização do método requer caracterização prévia dos insumos para definição de índices de correção e ajuste nos cálculos, sendo imprescindível a realização de testes de resistência no concreto dosado anteriores à adoção do traço calculado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente estudo foi baseado na comparação entre duas dosagens distintas de concreto, uma com traço convencional, dosado pelo método experimental ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, e outra com a substituição do agregado miúdo do traço convencional por agregado miúdo empacotado pela relação definida na equação (A).

Para a dosagem, foi necessário realizar a caracterização completa dos diversos componentes, destacando-se as análises no cimento Portland e nos agregados para definição de parâmetros de entrada no cálculo da composição da mistura. Para a realização das dosagens foi considerada resistência a 28 dias (fck) igual a 20 MPa, controle tipo A⁽⁶⁾ com uso do cimento CPIIE-32.

Os testes de caracterização foram realizados segundo a normas ABNT e Mercosul, com destaque para as caracterizações de massa específica e unitária e curvas granulométricas.

Para o concreto convencional (CCon), adotou-se amostra comercial controlada de areia e agregado graúdo de gnaiss. A caracterização completa foi estabelecida como parâmetro de controle para a elaboração dos diversos corpos de prova (CP’s) de concreto produzidos. Para o concreto empacotado (CEmp), adotou-se traço corrigido com a substituição da areia comercial (AC) utilizada no CCon pela areia com curva corrigida, preparada pelo peneiramento da AC e separação das quantidades por peneira definidos pela equação (A). A caracterização dos insumos constituintes das misturas foi realizada seguindo os procedimentos normalizados pela ABNT, em amostragens representativas do material separado para a produção dos CP’s dos concretos analisados. A análise do cimento Portland e dos agregados miúdos e graúdos possibilitou a realização dos cálculos de dosagem e correções previstas no método ABCP utilizado. Com base na equação (A), o agregado miúdo foi peneirado utilizando-se as malhas ABNT Série Normal, conforme NBR 7211:2019.

Após a definição da quantidade de CP’s de concreto necessários para as avaliações propostas, foi projetada quantidade de areia necessária para os traços, com margem de segurança de 40%, a fim de que a mistura contasse com quantidade suficiente de material em uma única ação.

Aplicando-se a equação (A), considerando que o empacotamento proposto restringiu-se apenas ao agregado miúdo da mistura, definiram-se os seguintes valores de massa por malha das peneira ABNT Série Normal (os valores foram representados em percentual por peneira, com duas casas decimais, referentes ao volume total de agregado miúdo utilizado no traço): 26,32% (2,4 mm), 21,05% (1,2 mm), 17,37% (0,6 mm), 14,21% (0,3 mm), 11,58% (0,15 mm), 9,47% (0,075 mm), e 0,00% (material passante na malha 0,075 mm).

Foram moldados CP's com o traço convencional e com traço com a equação (A) de empacotamento dos grãos utilizando a NBR 5738:2015⁽⁷⁾ em quantidades suficientes para a realização de ensaios de ruptura por compressão em 3, 7 e 28 dias, bem como a realização de avaliação de porosidade por absorção de água. O procedimento de cura foi realizado em todas as amostras de forma controlada para que os dois conjuntos de análise não sofressem variações neste quesito. Os CP's convencionais foram moldados segundo procedimento normalizado. Os CP's empacotados foram moldados pelo método preconizado pela referida norma e, em seguida, foram submetidos à realização de pré-carga, com o auxílio de embolo metálico e equipamento de compressão hidráulico, sendo aplicada carga de compactação equivalente a 1 Mpa (800,86 kgf por cilindro).

Após a cura e antes da ruptura, as faces de cada CP foram submetidas a processo de retificação (corte com lâmina úmida), eliminando saliências nas faces de carregamento.

As análises de resistência e de absorção de água foram realizadas para os dois conjuntos sempre de forma concomitante, sem extrapolar o intervalo máximo de 10 minutos entre avaliação de exemplares de cada grupo para uma mesma análise. A avaliação da absorção de água foi desenvolvida seguindo os procedimentos preconizados pela NBR 9778:2009⁽¹⁰⁾.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A realização dos estudos descritos no procedimento metodológico resultou em valores de caracterização de cada insumo da mistura (valores não apresentados neste artigo), que, quando aplicados ao método de dosagem utilizado, geraram os traços de concreto I(convencional) e II (empacotado). O traço padrão considerado, em massa, foi de (Cimento : Areia : Brita 0 : Brita 1 : Água : Plastificante) 1 : 1,9 : 1,4 : 1,4 : 0,55 : 0,01. A AC foi medida com as seguintes massas (kg): 0,50 (2,4 mm), 0,40 (1,2 mm), 0,33 (0,6 mm), 0,27 (0,3 mm), 0,22 (0,15 mm), 0,18 (0,075 mm), sem material passante na malha 0,075 mm. Já a areia otimizada pela equação (A) foi medida nas seguintes frações (kg): 0,14 (2,4 mm), 0,31 (1,2 mm), 0,52 (0,6 mm), 0,43 (0,3 mm), 0,30 (0,15 mm), 0,20 (0,075 mm), e 0,00% (material passante na malha 0,075 mm). Com relação aos dois traços desenvolvidos, observou-se que o traço empacotado resultou em perda de reologia da mistura, pelo aumento considerável da superfície de grãos pela correção granulométrica para o empacotamento. Este fator, entretanto, foi compensado na moldagem dos CP's pela aplicação da pré-carga descrita na metodologia.

A verificação quanto a absorção de água, seguindo os parâmetros descritos na metodologia, indicou os valores de absorção média de água igual a 20,64% para o concreto com o traço convencional de 20,43% para o concreto com traço empacotado. Apesar de os índices representados indicarem valores médios corrigidos, ressalta-se que nenhum dos CP's de CEmp teve absorção superior ao menor valor de absorção encontrado para os CP's de CCon. A redução da absorção de água nos CP's empacotados, apesar de discreta, indica o melhor preenchimento dos vazios internos pela correção de traço apontada pelo modelo matemático adotado (A), confirmando a expectativa inicial deste trabalho.

O aumento do empacotamento dos grãos de agregado miúdo implicou em aumento da densidade aparente do concreto, confirmando as expectativas de maior aumento do preenchimento de vazios externos. A densidade média dos CP's de CCon atingiu 2.110,8 g/dm³, enquanto que nos CP's com empacotamento o valor médio foi de 2,124,4 g/dm³.

Os ensaios de análise de resistência à compressão axial apontaram elevação da resistência do concreto com otimização do empacotamento do agregado miúdo pela equação (A) em valores médios indicando aumento de 48,4%, sendo que o valor da resistência apresentada pelo exemplar de concreto com empacotamento que atingiu o maior resultado à compressão com 28 dias foi 135,5% superior ao valor do corpo de prova de traço convencional com menor resistência. Os valores de resistência à compressão corrigidos para o traço convencional e para o com otimização de empacotamento, já aplicados os ajustes da média por desvio padrão, descartando-se valores das amostras de elevada discrepância, foram de 20,98 Mpa (traço convencional) e 31,13 Mpa (traço com otimização de empacotamento). Destaca-se que as moldagens do CP's com correção de empacotamento foram sucedidas por aplicação de pré-carga, sendo observada exsudação de água na moldagem, o que aponta a necessidade de aprofundamento das análises, já que, nestes CP's, a relação água cimento sofreu alteração sensível, o que pode também ter implicado em aumento da resistência final, indicando que o empacotamento não fora a única variável de influência no aumento do desempenho à compressão.

CONCLUSÕES

Este estudo abordou a importância do empacotamento dos grãos dos agregados do concreto sobre o seu comportamento mecânico e a sua porosidade. A avaliação da absorção de água nos traços convencional e com otimização de empacotamento indicou redução sensível da porosidade e aumento considerável na resistência à compressão axial após 28 dias. O aumento da densidade aparente do concreto com empacotamento com relação ao traço convencional também foi observado, confirmando o preenchimento de parte dos vazios por grãos de agregado miúdo. A metodologia aplicada foi adotada com critérios de controle nos parâmetros de moldagem e cura, dentre elas a temperatura, tempo e controle de equivalência de insumos, contudo, a aplicação de pré-carga adotada nos traços com otimização de empacotamento para compensação da perda de reologia proveniente do aumento de superfície granular sem aumento da quantidade de água implicou em exsudação, o que interferiu também na relação água cimento, podendo esta redução ter contribuído de forma considerável no aumento de resistência e redução de poros observados, apontando, desta forma, para a necessidade de realização de estudos futuros mais aprofundados sobre o tema.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à PUC Minas pelo incentivo à realização desta pesquisa, através da disponibilização de estrutura humana e de ferramental, e pelo fornecimento dos insumos utilizados, confirmando o propósito constante desta conceituada instituição de fomentar o conhecimento e o desenvolvimento da ciência para o consecutivo progresso da sociedade.

REFERÊNCIAS

1. CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmicas*, 55, 18-32, 2009.
2. BAUER, L. A. Falcão. *Materiais de Construção*. Ed. Livros Técnicos e Científicos. Ltda., 5. Ed., V. 1, 1997.
3. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais* – 2. Ed. Ed. IBRACON. 2008.
4. PETRUCCI, Eladio G. R. *Concreto de cimento Portland*. 13. Ed. São Paulo: Globo, 1998.

5. VANDERLEI, Romeu Dias. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas / Romel Dias Vanderlei. – São Carlos, 2004.
6. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. 2015.
7. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2009.
8. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – Agregados para concreto - Especificação. 2019.
9. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2015.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF GRAIN PACKAGING ON THE STRENGTH AND POROSITY OF CONCRETE

ABSTRACT

Most of the studies on concrete technology are aimed at the development of mixtures between binders, aggregates, additions and additives that allow better mechanical performance and greater durability, with emphasis on the compressive strength responses and also the reduction of permeability. This research aimed to evaluate the influence of the optimization of the grain packing of the fine aggregate fraction in portland cement concrete in relation to the gain of compressive strength at 28 days and also the reduction of the total porosity, proposing a granulometric composition in curve with high filling of voids through granulometric separation in the fine aggregate used. For the evaluation, a model of separation of granulometric fractions of fine aggregate and ultrafine particles was used to, after separation, constitute fine aggregate with a high packing curve. The portion of fine aggregate with optimized curve was used in the integral replacement of fine aggregate in conventional mix, dosed by the ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) method for conventional concrete with a minimum compressive strength of 20 MPa after 28 days, being made comparison between the conventional and the modified trait. In the comparative study model between the conventional mix concrete and the one with the substitution of the sand of common granulometry for optimized sand, control of the main variables of dosage contour was carried out, among them the contents of the different inputs, the molding temperature, the rheology, among others, with the substitution between the two types of aggregate being the only direct change between the traits compared. The experimental analysis for the study of the properties of the concrete with optimization of the fine aggregate curve showed that the optimization of the packing of the grains interfered directly in the performance of the altered concrete in the parameters compressive strength and total porosity when compared to the conventional concrete, with an increase in the strength compression at 28 days higher than 135% of the value obtained in the conventional mix. The total porosity for the specimens of the optimized mix showed lower values than the conventional mix, through the absorption test by total immersion. In this way, the study proved the effectiveness of the process of optimizing the granulometric curve of the fine aggregate in the portland cement concrete mixture to increase compressive strength and reduce porosity.

Keywords: Concrete, Packaging, Fine Aggregate, Porosity, Strength