

Influência da porosidade de empacotamento dos finos nas propriedades no estado endurecido de microconcretos

(Influence of the packing porosity of the matrix on the hardened state properties of microconcretos)

G. M. Peres¹; J. A. F. S. Mesquita¹, R. C. Oliveira, R. G. Pileggi¹

¹ Departamento de Engenharia de Construção Civil / Escola Politécnica / Universidade de São Paulo

Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo

guilherme.mperes@usp.br

Resumo

Diferentes estratégias de dosagem possibilitam a redução da quantidade de cimento e água nas composições de concretos, tornando-o mais ecoeficiente sem perda das propriedades durante o uso. Neste trabalho foram formulados microconcretos mantendo-se constante a distribuição granulométrica dos agregados, o consumo de cimento (798 kg/m³) e a quantidade de água de amassamento, alterando-se somente a proporção dos fillers. O teor de sólidos de todas as composições foi mantido constante, resultando em alterações na mobilidade das partículas, estimada a partir do modelo de IPS (*interparticle separation distance*), e no empacotamento dos grãos. O estado fresco foi monitorado por reometria rotacional e no estado endurecido foram avaliados os impactos na resistência mecânica e porosidade. Os resultados indicaram que o melhor empacotamento dos grãos facilitou a mistura e o fluxo dos materiais, favorecendo a moldagem, e houve significativa alteração nas propriedades no estado endurecido.

Palavras chave: Empacotamento de partículas, dispersão, microconcreto, estado endurecido.

Abstract

Different dosages in concrete compositions allow for cement and water content reduction, increasing eco-efficiency without changes in properties. For this research, microconcretos were formulated preserving grain size distribution of the aggregates, cement consumption (798 kg/m³) and the amount of kneading water, while changing filler proportion. As solid content in all compositions was kept constant, microconcrete action lead to changes in particle mobility, estimated from the IPS (interparticle separation distance) model, and in grain packing density. At the fresh state, the concrete was monitored by rotational rheometry and, after reaching the hardened state, impacts on mechanical strength and porosity were evaluated. The results indicated that the better grain packing density aided in the mixing and improved flow of the materials, favoring the molding, and that there was a significant change in properties at the hardened state.

Keywords: Particle packing, dispersion, microconcrete, hardened state properties.

INTRODUÇÃO

Conciliar o desenvolvimento da indústria e tecnologias em geral levando em conta a proteção ao meio ambiente e os impactos sobre as gerações futuras é um desafio constante no setor construtivo. Neste contexto, é de responsabilidade geral a busca por soluções que diminuam os impactos ambientais causados pelas atividades humanas.

Atualmente, estima-se que o setor de construção civil seja responsável pelo consumo de 50% dos recursos naturais do mundo, sendo o cimento o produto industrializado mais utilizado [1][2]. Uma vez que este setor requer quantidades significativas de materiais, é de se esperar que o impacto da construção civil seja significativo sobre o meio ambiente. Mais ainda, o consumo de cimento é responsável por mais de 7% das emissões atuais de CO₂ à atmosfera, contribuindo para o agravamento do aquecimento global [2]. Estima-se que esse valor ainda irá crescer no caso da manutenção das práticas atuais de produção e dosagem, chegando a 30% do total até 2050.[2] Assim, o estudo de soluções que visam reduzir o consumo de cimento se faz mister.

Uma das possibilidades para otimização dos materiais empregados é através do aperfeiçoamento do empacotamento de partículas, reduzindo o volume de vazios microestruturais. Com isso, a proximidade das partículas resulta em diminuição da demanda de água para o preenchimento dos vazios e afastamento dos grãos, mantendo a mobilidade com o menor teor de fluído possível [3].

Desta forma, é possível diminuir a quantidade de cimento nas composições sem perdas nas características dos produtos no estado endurecido [4], ou mesmo durante a mistura, transporte e aplicação dos componentes.

O presente trabalho permitiu avaliar a influência da variação da porosidade de empacotamento dos finos nos estados fresco e endurecido de composições de microconcretos, alterando a proporção entre os fillers de diluição (distribuição granulométrica similar à do cimento) e de preenchimento (distribuição granulométrica menor que a do cimento), sem alterar a porosidade dos agregados e o consumo de água.

MATERIAIS

A fim de se produzir o microconcreto com diferente porosidade de empacotamento foi utilizado cimento Portland do tipo CPV (Holcim), areia fina natural de quartzo, areia moída média, areia moída grossa, filler de preenchimento (F1) e filler de diluição (F2). Policarboxilato de sódio foi o aditivo utilizado para promover a dispersão química das partículas, possibilitando

a diminuição da quantidade de água de amassamento, fixada em 260 kg/m^3 . Com isso, a relação água/sólidos foi mantida em 12%-massa e a relação água/cimento em 4,4%-massa.

MÉTODOS

A distribuição do tamanho das partículas grossas foi determinada em um equipamento Qicpic, da marca Sympatec, pelo método de análise dinâmica de imagem, enquanto a distribuição granulométrica das partículas finas foi determinada em suspensão aquosa, em um equipamento Sympatec, modelo Helos KR, com um range de detecção entre 0,1 e $350 \mu\text{m}$.

A área superficial específica (ASE) foi obtida de acordo com o método BET em um equipamento Belsorp Max, Bel Japan, e a densidade real das matérias primas em um picnômetro de gás hélio Multipycnometer - Quantachrome Instruments.

Uma vez que o foco do trabalho é a análise da influência da porosidade de empacotamento dos finos no estado endurecido do microconcreto, optou-se por apresentar e discutir as características físicas das matérias primas na sequência.

A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica das partículas, enquanto na Tabela I são apresentados os resultados referentes à densidade real, área específica e diâmetro característico dos materiais secos.

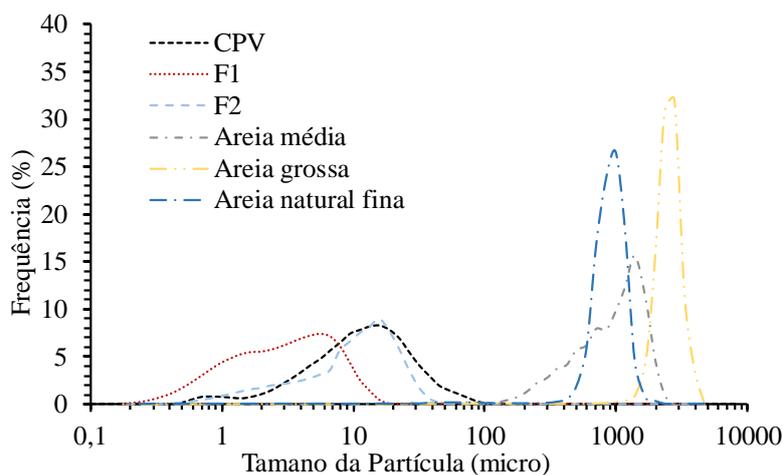


Figura 1. Distribuição granulométrica das partículas

Tabela I. Densidade real, área superficial específica e diâmetros característicos dos materiais secos

Materiais secos	Densidade Real (g/cm^3)	Área específica (m^2/g)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
CPV	3,29	1,31	1,48	5,45	14,7
F1	2,78	3,73	0,86	5,07	11,8
F2	2,78	1,73	0,86	3,33	9,08
Areia natural fina	2,85	0,50	2070	2744	3528
Areia média	2,76	0,30	363	1080	1845
Areia grossa	2,77	0,20	713	999	1305

O cimento Portland apresenta características coerentes com o esperado, sendo 50% das partículas menores que $5,45\mu\text{m}$. Como o foco principal do trabalho foi alterar o empacotamento das partículas finas sem alteração nas características químicas dos materiais, utilizou-se filler dolomítico com duas frações granulométricas. O produto com maior quantidade de partículas mais finas que o cimento (F1) foi denominado como filler de preenchimento, pois possibilita melhorar o empacotamento das partículas. Já o F2, com distribuição granulométrica similar à do cimento, foi utilizado como material de substituição, ou seja, serviu para diminuir a quantidade de cimento sem alterar significativamente o empacotamento. Em função de elevada quantidade de finos, o F1 apresenta área superficial específica maior do que o F2.

As areias britadas média e grossa são provenientes de rocha calcária, e as frações foram separadas por peneiramento, enquanto a areia natural é de quartzo. Os valores de área superficial específica seguiram a tendência esperada (quanto mais grossa a areia, menor o valor de ASE), mesmo não sendo materiais de mesma composição mineralógica.

Composições avaliadas

A estratégia de formulação dos microconcretos foi baseada na alteração do proporcionamento das partículas finas (cimento, F1, F2), mantendo-se a relação entre finos e agregados fixa e o proporcionamento dos agregados constante. Sendo assim, a variável de interesse no trabalho foi a porosidade de empacotamento (inversa ao índice de vazios de empacotamento).

Apesar de haver vários modelos de empacotamento, optou-se pela aplicação dos conceitos de *Westman e Hugill* [5] modificado por *Dinger e Funk* [6], no qual calcula-se inicialmente o volume aparente (V_{ai}) de cada classe conforme ilustrado na Equação A. Em seguida, a partir do volume aparente se calcula a mínima porosidade esperada (P_{of}) conforme ilustrado na

Equação B, onde V_a é o maior volume aparente calculado.

$$V_{ai} = \sum_{j=1}^{i-1} x_j + a_i x_i \quad \text{Equação A}$$

x_j = massa da fração volumétrica calculada; a_i = volume aparente na monodispersão da distribuição granulométrica; x_i = fração de massa de cada tamanho i de partícula.

$$P_{of} = 40 \left(1 - \frac{1}{V_a} \right) \% \quad \text{Equação B}$$

Por uma questão didática, as composições avaliadas no trabalho foram nomeadas com o valor da porosidade de empacotamento dos finos, conforme indicado na Tabela II.

O proporcionamento dos agregados foi mantido constante, assim como a razão entre os finos e os agregados (70% finos: 30% agregados, em massa), a quantidade de água de amassamento (12% em massa em relação à quantidade total de pó) e o teor de aditivo superplastificante. Merece ser salientado que a quantidade de finos é elevada por se tratar de uma pesquisa na qual se busca o desenvolvimento de microconcretos como o HPC (*high performance concrete* – resistência à compressão acima de 80MPa).

Na Tabela II são apresentados os consumos de matéria prima para cada composição formulada, em quilogramas de cada material por metro cúbico de concreto. Para facilitar a visualização, a quantidade de materiais em %-massa também é apresentada.

Tabela II. Composições avaliadas para diferentes porosidades de empacotamento

Porosidade de empacotamento dos finos	11,6		12,9		15,3	
Matérias primas	Consumo (kg/m ³)	Massa (%)	Consumo (kg/m ³)	Massa (%)	Consumo (kg/m ³)	Massa (%)
CPV	798,3	37	798,3	37	798,3	37
F1	719,4	33	110,8	13	55,5	7
F2	-	-	166,3	20	221,4	27
Areia Natural Fina	145,3	7	145,3	7	145,3	7
Areia Média	346,9	16	346,9	16	346,9	16
Areia Grossa	158,3	7	158,3	7	158,3	7

Com base nos resultados obtidos de porosidade de empacotamento (P_{of}), no proporcionamento das matérias primas e no teor de água, foi calculado o parâmetro IPS (*interparticle separation distance*) a partir da Equação C [3].

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \quad \text{Equação C}$$

onde, VSA é a área superficial volumétrica (produto entre densidade real e área superficial específica), e V_s é o volume de sólidos.

O parâmetro de empacotamento dos grãos permite, somente parcialmente, explicar algumas propriedades no estado endurecido, porém o IPS associa em um único parâmetro as variáveis porosidade de empacotamento, volume de sólidos e área superficial volumétrica, sendo mais coerente para a explicação do impacto nas características dos produtos após o endurecimento.

O mesmo cálculo de mobilidade das partículas grossas (MPT [3]) poderia ter sido realizado, porém como as composições foram formuladas sem alteração no proporcionamento

dos agregados e na razão entre os finos e os agregados, os valores são os mesmos, não sendo considerado para este trabalho.

Os parâmetros de mobilidade e empacotamento de partículas obtidos a partir dos resultados de IPS e do modelo de *Westman e Hugill* para cada composição são apresentados na *Tabela III*.

Tabela III. Variação do IPS em função das alterações na área superficial volumétrica e na porosidade de empacotamento dos finos

Porosidade de empacotamento dos finos (%)	11,6	12,9	15,3
VSA (m^2/cm^3)	5,06	3,60	3,11
IPS (micra)	0,105	0,145	0,153

O valor de IPS é inversamente proporcional ao volume de sólidos, à área superficial volumétrica e à porosidade de empacotamento. No entanto, como pode ser notado, com a otimização da porosidade de empacotamento houve diminuição no valor. Esse fato ocorreu porque a alteração na área superficial específica das partículas governou a mobilidade. Por isso, a discussão dos resultados será realizada com base em ambos os parâmetros.

Mistura, moldagem e cura

A mistura foi realizada em um reômetro PHESO, Calmetrix (Figura 2a). O pó foi adicionado na cuba do equipamento e, durante os primeiros 60 segundos ocorreu um processo de homogeneização dos produtos secos em rotação equivalente a 100 rpm. Em seguida, água foi adicionada a uma taxa constante de 90 g/s e a mistura realizada durante 6 minutos em uma rotação de 350 rpm. O setup utilizado para a mistura está na Figura 2b. Foram confeccionados 6 corpos de prova cilíndricos ($\phi = 50\text{mm} \times 60\text{ mm}$) para cada amostra, moldados em uma mesa vibratória sob 60% da potência máxima, a fim de reduzir a quantidade de bolhas de ar.

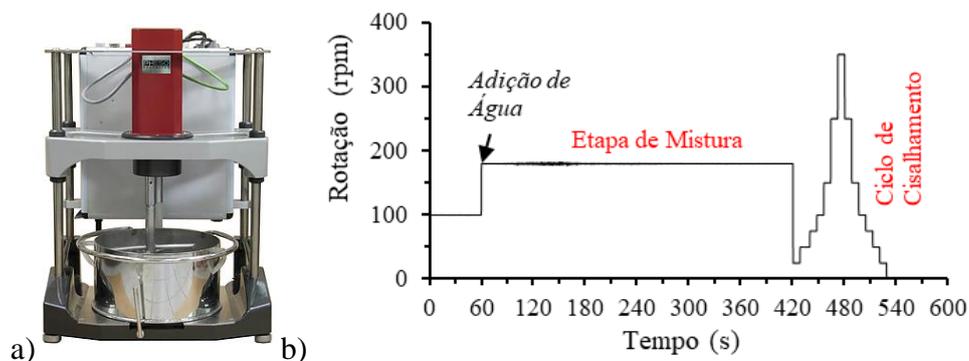


Figura 2. Reômetro PHESO, Calmetrix (a) e setup usado para a mistura (b)

Os corpos de prova foram acondicionados em uma câmara seca, com controle de temperatura em $23^{\circ}\text{C} \pm 3$ e umidade relativa de 50% por 3 dias. Em seguida, foram desmoldados

e transferidos para uma câmara úmida ($T = 23^{\circ}\text{C} \pm 3$, 100% de umidade), onde permaneceram até 28 dias de cura. Para a realização dos ensaios no estado endurecido, os corpos de prova foram secos à 50°C até a estabilização da massa.

Estado endurecido

A porosidade foi determinada a partir do método de imersão de Arquimedes. Inicialmente se mediu a massa seca de cada corpo de prova que, na sequência, foram completamente submersos em água. Aplicou-se vácuo por 2 horas e manteve-se os microconcretos no recipiente fechado à vácuo até completar 24 horas. Após esse tempo, mediu-se a massa imersa de cada corpo de prova e a massa úmida, na qual o corpo de prova foi levemente seco com um pano úmido. Assim, foi possível obter a porosidade total e a porosidade aberta [7].

A resistência a compressão uniaxial foi determinada seguindo os parâmetros da norma NBR 7215: “*Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*” [8], em uma máquina universal de ensaio, Shimadzu, com controle de carregamento de 490 N/s até a ruptura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando contemplar o objetivo do trabalho, a apresentação dos resultados foi realizada em duas etapas, em que são discutidos o impacto do empacotamento de partículas finas no estado fresco (i) e endurecido (ii).

i. Estado fresco

A Figura 3 mostra os resultados para o estado fresco. Em (a) é apresentado a variação do torque durante a fase de mistura, enquanto em (b) foi correlacionada a energia necessária para a mistura com a porosidade de empacotamento dos finos.

Após o primeiro contato da água com o pó diversos fenômenos são observados [3], resultando em mudanças na consistência da composição durante a mistura. Assim, o torque aumenta em função da rápida aglomeração das partículas, resultado das forças de atração capilares e de Van der Waals que atuam sobre elas, ocorrendo a retenção da água no interior dos aglomerados [3].

Com a manutenção do cisalhamento, o aumento do torque ocorre até o ponto em que as forças de aglomeração são predominantes sobre o rompimento dos aglomerados, e o tempo para que isso ocorra é denominado tempo de virada, ilustrado como círculos pretos.

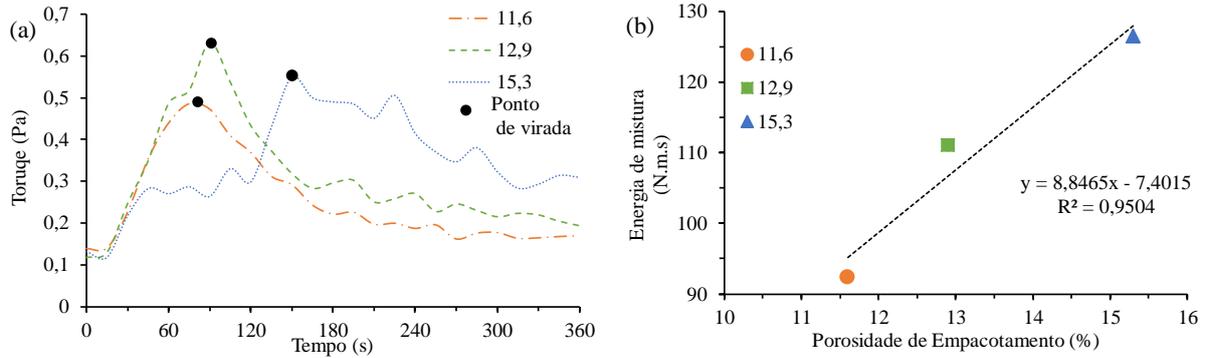


Figura 3. Reometria de mistura (a) e correlação entre energia de mistura e porosidade de empacotamento (b)

Toma-se como parâmetro numérico de consistência do microconcreto o torque final de mistura e a partir da determinação da área abaixo da curva há indicativo da energia necessária para o processamento do produto [9].

Todos os estágios descritos apresentaram relação direta com os parâmetros de empacotamento e mobilidade das partículas, respectivamente P_{of} e IPS, convergindo com resultados obtidos em literatura [9][10].

ii. Estado endurecido

A Figura 4 apresenta os resultados de porosidade total e aberta, obtidas pelo método de imersão de Arquimedes, em função da porosidade de empacotamento e distância de separação entre as partículas – IPS.

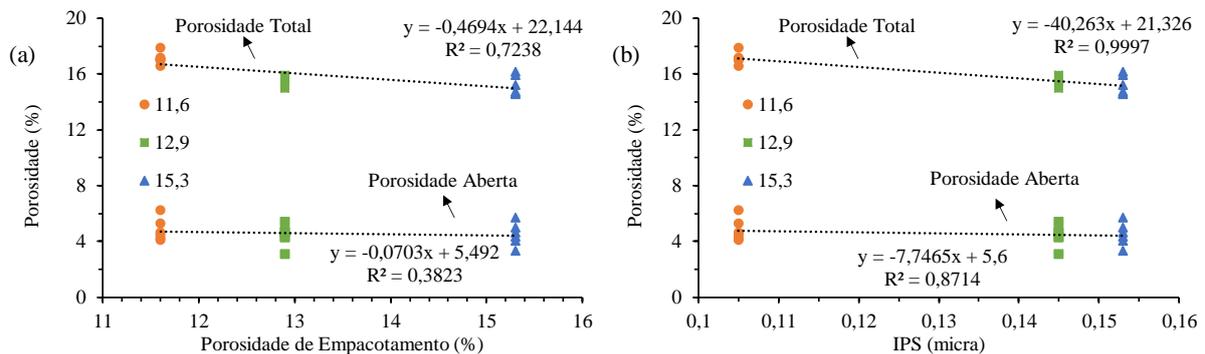


Figura 4. Porosidade em relação à porosidade de empacotamento (a) e em relação ao IPS (b)

A alteração na porosidade de empacotamento resulta em variação do volume de vazios entre as partículas. Desta forma, a quantidade de água necessária para o preenchimento dos vazios e afastamento das partículas é distinta. Como o consumo de água foi mantido constante, quanto menor o volume de poros (porosidade de empacotamento 11,6%) há maior quantidade de líquido em excesso durante a mistura, resultando em maior porosidade total e aparente.

Sabe-se que a adequada otimização do proporcionamento entre as partículas resulta em composições com menor demanda de líquido para a manutenção da consistência das massas durante a mistura, podendo, no caso da variação do consumo de água, obter resultado divergente com relação à porosidade total e aparente no estado endurecido [3].

A relação entre as porosidades e os vazios de empacotamento foi menor do que a correlação com a distância de separação entre as partículas – IPS.

Em relação aos resultados de resistência à compressão, estes foram correlacionados com o IPS e com a porosidade total, conforme ilustrado na Figura 5. A porosidade de empacotamento de cada amostra foi indicada e os pontos pretos são os resultados médios para cada porosidade de empacotamento.

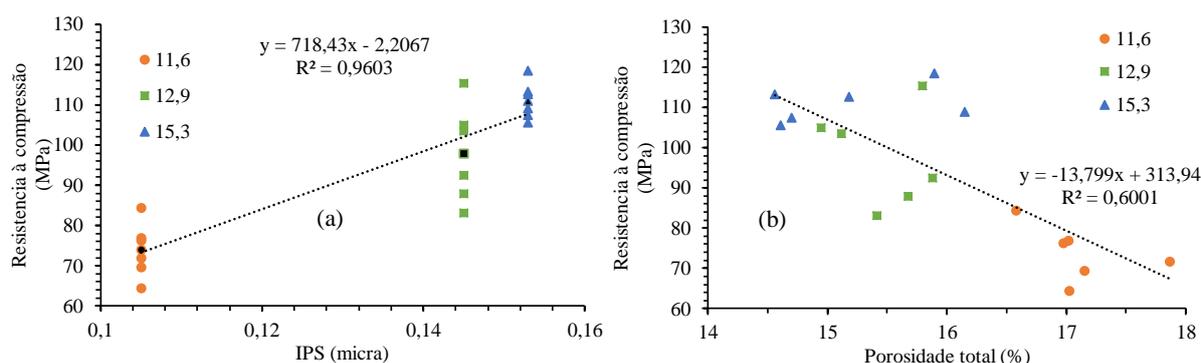


Figura 5. Resistência à compressão em relação ao IPS (a) e em relação à porosidade total

A porosidade total é uma das principais variáveis relacionada à resistência à compressão dos materiais, sendo que quanto maior o volume de poros na matriz, menor será a resistência[1]. A Figura (b) ilustra essa relação obtida com as diferentes porosidades de empacotamento. Assim, porosidades de empacotamento menores obtiveram uma maior porosidade total e menor resistência à compressão, convergindo com o que foi observado em [11][12].

CONCLUSÕES

Este trabalho concluiu que variando-se a porosidade de empacotamento dos finos, calculada a partir do modelo de *Westman e Hugill*, as propriedades nos estados fresco e endurecido foram afetadas.

Melhorando-se a porosidade de empacotamento dos finos sem alterar o consumo de água, acarretou em um aumento na porosidade total e em uma consequente diminuição na resistência à compressão. Com a otimização do proporcionamento dos finos e consequente redução do volume de vazios, há necessidade de menor quantidade de água para preenche-los e afastar as partículas. Por isso, houve excesso de líquido que resultou em geração de maior quantidade de poros após o endurecimento.

É fato que os concretos são moldados com a manutenção da consistência e, para tanto, nos produtos avaliados neste trabalho seria necessária a utilização de menor quantidade de água para o amassamento das composições com melhor empacotamento dos finos. Por isso, em uma segunda etapa desse trabalho serão avaliadas as mesmas composições fixando-se a consistência a partir da variação do consumo de água.

Essa estratégia é importante para o desenvolvimento de componentes cimentícios que associem o desempenho mecânico com reduzido consumo de ligante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Projeto 2014/50948-3 – INCT CEMtec – Tecnologias Cimentícias Ecoeficientes-Avançadas), e a Alcoa Foundation pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] B. L. Daminieli, “Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.”, Tese, Universidade de São Paulo, 2013.
- [2] K. L. Scrivener, V. M. John, e E. M. Gartner, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, p. 2–26, dez. 2018.
- [3] I. R. Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, e V. C. Pandolfelli, *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte Editora, 2000.
- [4] V. M. John, B. L. Daminieli, M. Quattrone, e R. G. Pileggi, “Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, p. 65–78, dez. 2018.
- [5] A. E. R. Westman e H. R. Hugill, “THE PACKING OF PARTICLES”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 13, nº 10, p. 767–779, out. 1930.
- [6] J. E. Funk e D. R. Dinger, *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] M. H. de F. Fonseca, M. P. S. Barbosa, Z. T. Vilar, U. P. de Lucena Junior, e C. J. de S. Lobo, “ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POROSIDADE EM MATERIAIS CERÂMICOS”, 22º CBECiMat - Congr. Bras. Eng. E Ciênc. Mater. 06 10 Novembro 2016 Natal RN Bras., 2016.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2019.
- [9] D. R. Torres, R. C. O. Romano, e R. G. Pileggi, “Influência da variação da velocidade de rotação e do tipo de cimento nas propriedades de argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido”, *Cerâmica*, vol. 63, nº 368, p. 508–516, dez. 2017.
- [10] R. P. N. Antunes, V. John, e R. G. Pileggi, “INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE MISTURA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE ARGAMASSAS AVALIADA POR SQUEEZE-FLOW”, p. 22.
- [11] R. C. de Oliveira e H. Schreurs, “Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas”, p. 10.
- [12] W. D. Callister, *Fundamentals of materials science and engineering: an interactive etext*. New York: Wiley, 2001.