

Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes

Determinação do teor ótimo de substituição do cimento Portland por pó de pedra usando métodos de empacotamento de partículas e análise do excesso de água na consistência de pastas

H. F. CAMPOS ^a

heloisacampos@ufpr.br
<https://orcid.org/0000-0002-9597-0231>

T. M. S. ROCHA ^a

thaisamsrocha@yahoo.com.br
<https://orcid.org/0000-0002-8586-6449>

G. C. REUS ^a

gio_reus@yahoo.com.br
<https://orcid.org/0000-0003-0443-4773>

N. S. KLEIN ^a

nayaraklein@ufpr.br
<https://orcid.org/0000-0002-7905-9608>

J. MARQUES FILHO ^a

jmarquesfilho@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4404-274X>

Abstract

Cement is considered the basic component with the highest environmental impact in construction, in terms of CO₂ emissions. As for the aggregates, the process of comminution of rocks, in addition to artificial sand, generates stone powder that ends up being stored outdoors, generating environmental damages. Thus, the replacement of cement by stone powder appears as an attractive alternative towards the sustainable concretes. In this context, the objective of this paper is to determine the maximum packing density in Portland cement, silica fume and stone dust pastes, to determine the optimal cement substitution content for the stone powder. In addition, it is intended to verify the influence of excess water on the consistency of the mixtures produced. The substitution was done in contents equal to 0%, 7%, 14% and 21% by volume and, for each content, the packing density was determined analytically by CPM model and combinations were reproduced experimentally. Excess water was checked by the mini Kanro cone test. The results showed that the higher cement substitution content of the stone powder obtained the higher packing density, experimental and analytical, and the higher workability, allowing economic and environmental advantages. Analyzing each material, the stone powder resulted in the highest packing density and silica fume is the lowest one. Therefore, finer particles resulted in lower packaging densities, due to the greater specific surface area, which demands more water. The agglomeration resulted in more empty gaps between the grains. In addition, mixtures flowability increased with the increase of the stone powder content. As the excess water is responsible for mixture lubrication, a higher packing density for a given volume of water improves the flowability.

Keywords: stone powder, cement paste, particle packing, excess water, sustainability.

Resumo

O cimento Portland é considerado o componente de base com o maior impacto ambiental na construção civil, em termos de emissões de CO₂. Quanto aos agregados, o processo de cominuição das rochas, além da areia artificial, gera pó de pedra que acaba sendo armazenado ao ar livre, gerando impactos ambientais. Assim, a substituição do cimento por pó de pedra aparece como uma alternativa atraente em direção à dosagem de concretos sustentáveis. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é determinar a máxima densidade de empacotamento de partículas em pastas compostas por cimento Portland, sílica ativa e pó de pedra, buscando determinar o teor ótimo de substituição do cimento pelo pó de pedra. Além disso, pretende-se verificar a influência do excesso de água na consistência das pastas produzidas. A substituição do cimento por pó de pedra foi feita em teores iguais a 0%, 7%, 14% e 21%, em volume, sendo determinada a densidade de empacotamento analiticamente, pelo modelo CPM. As combinações foram reproduzidas experimentalmente. A consistência das pastas foi verificada com auxílio do mini cone de Kanro. Os resultados demonstraram que o maior teor de substituição do cimento pelo pó de pedra apresentou a maior densidade de empacotamento, experimental e analítica, e a maior trabalhabilidade, permitindo vantagens econômicas e ambientais. Analisando cada material individualmente, o pó de pedra apresentou a maior densidade de empacotamento e a sílica ativa a menor. Partículas finas resultam em menor densidade de empacotamento, devido à maior superfície específica, a qual demanda mais água. A aglomeração aumenta os vazios entre os grãos. Além disso, a fluidez das pastas produzidas aumentou com o acréscimo do teor de pó de pedra. Como o excesso de água é o responsável pela lubrificação da pasta, uma densidade de empacotamento mais elevada colabora para o aumento da fluidez quando o volume de água permanece fixo.

Palavras-chave: pó de pedra, pasta de cimento, empacotamento de partículas, excesso de água, sustentabilidade.

^a Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil, Curitiba, PR, Brasil.

1. Introdução

A extração da areia natural é responsável pela retirada da cobertura vegetal dos solos, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente, o que dificulta a obtenção de licenças ambientais para o aproveitamento de novas jazidas deste agregado [1; 2; 3; 4]. O impacto ambiental advindo do uso deste material é ainda agravado pela informalidade nos processos de extração [1; 5; 6]. Desse modo, a substituição da areia natural pelo agregado miúdo de britagem, a areia artificial, aparece como alternativa atraente e tem sido estudada há alguns anos [1; 2; 3; 7; 8]. Porém, a lavagem da areia artificial gera pó de pedra, caracterizado pelo material passante na peneira #200 (0,075 mm) que é estocado ao ar livre. Esse material estocado nas pedreiras causa alteração da paisagem, criando impacto ambiental, obstrução de canais de drenagem em virtude da sua deposição e geração de poeira nas operações de britagem [6]. Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade às empresas, traz benefícios ao meio ambiente.

Diversos estudos vêm sendo feitos com o intuito de incorporar o pó de pedra em concretos convencionais, incrementando e/ou substituindo o agregado miúdo [8; 9]. A substituição parcial do cimento Portland é outra estratégia que pode ser adotada na tentativa de incorporação do pó de pedra em concretos. Esta estratégia é ambientalmente atrativa, dado que as emissões de CO₂ associadas ao cimento Portland representam cerca de 5 e 7% das emissões antropogênicas de CO₂ em todo o mundo [10], as quais se devem ao consumo de combustíveis fósseis e à decomposição do calcário, já que este é constituído de 44% de CO₂ [5]. Na indústria nacional, a emissão de CO₂ do clínquer gira em torno de 600 kgCO₂/t produzida [11]. Considerando a associação bem estabelecida entre as emissões de CO₂ e as mudanças ambientais, em especial o aquecimento global, há uma necessidade socioambiental contínua de redução das emissões industriais de CO₂, justificando estratégias que visem a redução do consumo de cimento em concretos.

Assim, conciliar a necessidade da redução do consumo de cimento em concretos com a utilização de resíduos de britagem, como o pó de pedra, é uma alternativa atraente em direção ao desenvolvimento sustentável. Ressalta-se, no entanto, que o pó de pedra é um material inerte com granulometria superior a do cimento [4; 8], o que dificulta o uso deste resíduo na obtenção de resistências mais elevadas. Por isso, estudos de substituição do cimento Portland por pó de pedra são mais comuns em concretos convencionais [8; 9]. Para compensar possíveis perdas de resistência associadas ao uso do pó de pedra, a sílica ativa é uma opção que poderia viabilizar o uso de pó de pedra na produção não somente de concretos convencionais, como também de concretos de alta resistência, ampliando as opções de uso deste resíduo.

É importante, então, determinar a proporção adequada de cada material nas misturas, buscando que as pastas, argamassas e concretos produzidos sejam tecnicamente eficientes. Os métodos de empacotamento de partículas podem auxiliar a alcançar esta meta. O empacotamento de partículas de uma mistura é promovido pela distribuição dos tamanhos de grãos componentes desta e define as propriedades reológicas do material [12]. Com o au-

mento da densidade de empacotamento é possível obter, além de uma maior fluidez, uma redução no consumo do fluido ligante para preencher os espaços entre os grãos [13; 14]. No caso de concretos, pode-se considerar a pasta de cimento como fluido que atua como ligante entre os grãos dos agregados. No caso de pastas, por outro lado, a água é o fluido que atua dando mobilidade às partículas de cimento Portland e adições minerais, de modo que um empacotamento eficiente das partículas finas resultará na redução do consumo de água das misturas, podendo também colaborar para que as pastas se tornem mais fluidas.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é determinar a máxima densidade de empacotamento de partículas em pastas compostas por cimento Portland, sílica ativa e pó de pedra, buscando determinar o teor ótimo de substituição do cimento pelo pó de pedra. A presença da sílica ativa justifica-se com o intuito de compensar possíveis perdas de resistência advindas do uso do pó de pedra. Pretende-se também verificar a influência do excesso de água na consistência das pastas produzidas.

2. Revisão bibliográfica

A determinação da densidade de empacotamento de partículas finas é um desafio, devido à aglomeração que estas partículas sofrem, de modo que são sensíveis à energia de compactação adotada, à presença de água e de aditivos plastificantes e superplastificantes. Logo, quando se deseja determinar a densidade de empacotamento de partículas finas que serão incorporadas em argamassas e concretos, não se recomenda usar métodos experimentais que considerem os materiais na condição seca. Isso pois os resultados obtidos não estarão representando a realidade das misturas, que apresentam água em sua composição e podem contar também com a presença de aditivos. A densidade de empacotamento dos materiais secos irá diferir da densidade encontrada quando os materiais fazem parte das misturas de argamassas e concretos. Outros métodos experimentais recomendam relacionar a densidade de empacotamento a testes de consistência. Estes tampouco são eficientes, pois apesar de possibilitarem considerar a presença de água e aditivos nas misturas, a consistência escolhida para se determinar a densidade de empacotamento é definida arbitrariamente, podendo os grãos apresentarem-se em diferentes condições de saturação, a depender do valor de consistência adotado. Além disso, o teor de ar nas misturas é muitas vezes negligenciado por estes métodos, resultando na subestimação do índice de vazios e superestimação da densidade de empacotamento [14; 15].

Com o objetivo de superar os problemas previamente citados, associados à determinação da densidade de empacotamento de partículas finas, Wong e Kwan [14] propuseram um novo método experimental, que pode ser adaptado a diferentes condições de compactação, permite considerar a presença de água, aditivos e também de ar nas misturas. Este método experimental, adotado no presente trabalho, será detalhado na continuação, no item 2.1. Além de métodos experimentais, modelos de previsão podem também ser adotados na busca de valores representativos da densidade de empacotamento de partículas. Alguns modelos, como o modelo CPM, proposto por De Larrard [16], apresentam

boa precisão nos resultados encontrados. Este modelo define a densidade de empacotamento de conjuntos granulares a partir da distribuição granulométrica e permite considerar o tipo de compactação aplicada. Ele permite também considerar aspectos como morfologia dos grãos, presença de água e aditivos de forma indireta, dado que demanda que se conheça a densidade de empacotamento de cada classe de grãos componente das misturas, parâmetro que deve ser determinado experimentalmente. O modelo analítico CPM, adotado no presente trabalho, será detalhado na continuação, no item 2.2.

2.1 Determinação experimental da densidade de empacotamento

A densidade de empacotamento das partículas finas foi determinada experimentalmente segundo método proposto por Wong e Kwan [14]. Este consiste em produzir pastas variando a relação água/sólidos (a/s) destas, para então determinar a densidade aparente de cada pasta produzida. Isso se faz através da determinação da massa de um volume conhecido de pasta, em que se utiliza, comumente, o recipiente para determinação da massa específica de argamassas. A partir disso, calcula-se a relação de vazios e a concentração de sólidos de cada mistura, segundo as equações (1) a (3).

$$V_s = \frac{M}{\rho_w u_w + \sum_{i=1}^n \rho_i R_i} \quad (1)$$

$$u = \frac{(V - V_c)}{V_c} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{V_c}{V} \quad (3)$$

Em que:

- V_s : volume de sólidos dos materiais finos presentes nas pastas;
- M : massa de pasta que preenche o recipiente para determinação da densidade aparente;
- V : volume do recipiente para determinação da densidade aparente;
- ρ_w : massa específica da água;

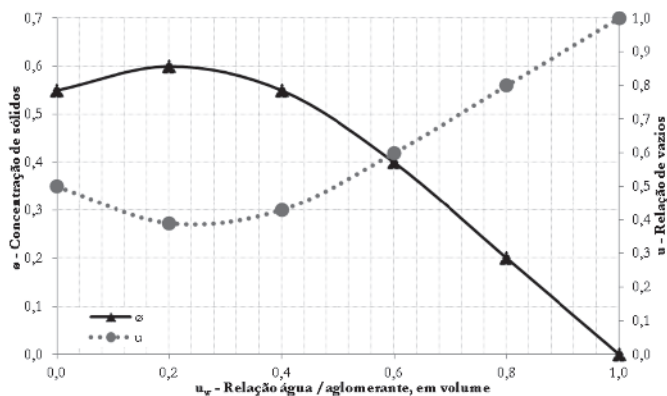


Figura 1
Gráfico típico obtido no ensaio de determinação da densidade de empacotamento na condição úmida, adaptado de [14; 37]

- u_w : relação a/s, em volume;
- ρ_i : massa específica do material i ;
- R_i : volume do material i em relação ao volume total de sólidos;
- u : relação de vazios;
- Φ : concentração de sólidos.

Por meio da equação (2), verifica-se que a relação de vazios é a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos na mistura, enquanto a equação (3) mostra que a concentração de sólidos é a razão entre o volume de sólidos e o volume de total de pasta presente no recipiente usado para realização do ensaio. Ressalta-se que os resultados obtidos tanto para a relação de vazios quanto para a concentração de sólidos estão associados à condição de dispersão dos grãos nas misturas. Para ilustrar esta associação, apresenta-se um gráfico típico obtido pela realização deste experimento na Figura 1.

A Figura 1 mostra que quando a relação a/s é elevada, a relação de vazios é também alta, enquanto a concentração de sólidos na mistura é baixa. Isso ocorre, pois as partículas do sistema estão

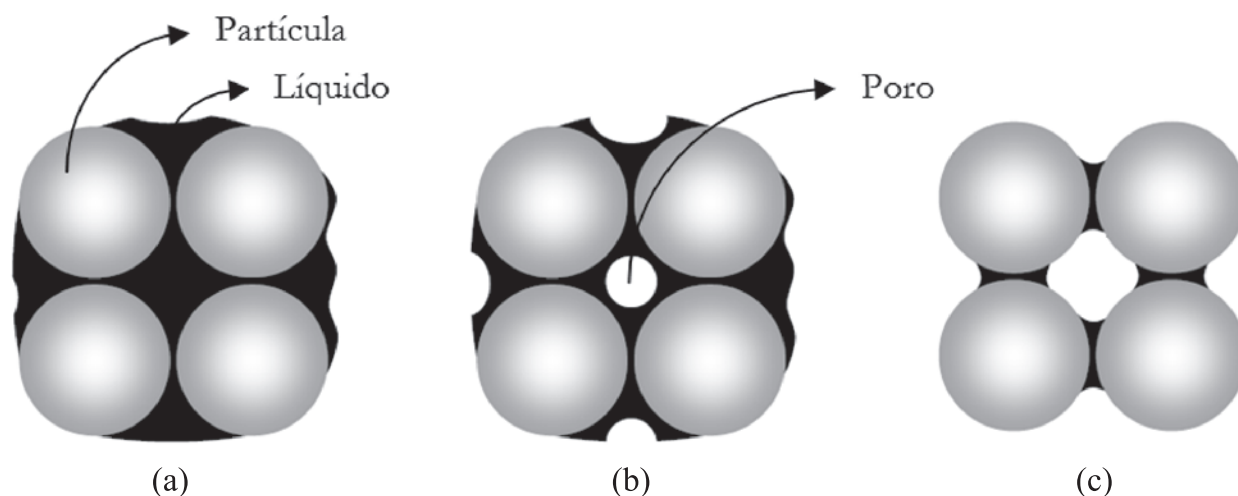


Figura 2
Condições de dispersão de partículas em água [adaptado de 19]

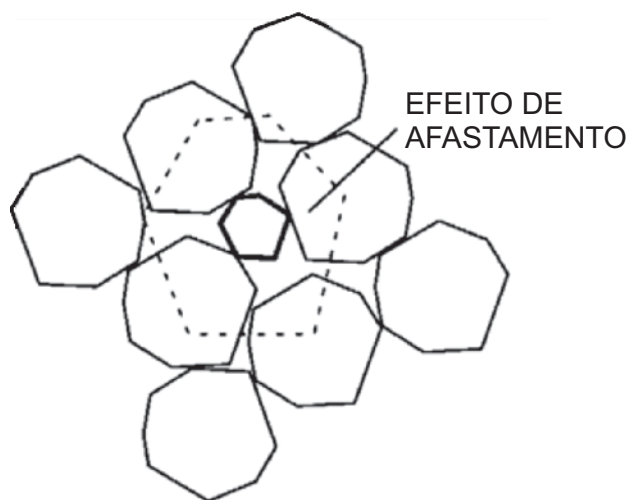


Figura 3
Efeito de afastamento (adaptado de [16])

dispersas em água, como mostra a Figura 2a, estando afastadas umas das outras por estarem envoltas por água. Conforme a relação a/s é diminuída, as partículas dispersas se aproximam umas das outras, de modo que a relação de vazios diminui e a concentração de sólidos aumenta progressivamente. Isso ocorre até que se alcance a condição em que a relação de vazios é mínima e a concentração de sólidos é máxima. Nesta situação, as partículas ainda estão envoltas por água, porém a água é apenas suficiente para molhar os grãos, havendo poros de ar no interior da mistura. Observa-se que as partículas sólidas estão em contato umas com as outras, como mostra a Figura 2b, de modo que é possível associar esta condição de máxima concentração de sólidos com a densidade de empacotamento da mistura. A partir deste ponto, se a relação a/s for novamente diminuída, o volume da água na mistura não será suficiente para envolver completamente as partículas sólidas, de modo que a água se concentrará nos pontos de contato entre os grãos. Isto faz com que haja certa distância entre partículas, tal como mostra a Figura 2c, de modo que a relação de vazios aumenta e a concentração de sólidos diminui [17; 18; 19]. Ressalta-se que o ensaio permite ainda determinar, no ponto de concentração de sólidos máxima, a quantidade mínima de água necessária à mistura para que ocorra a formação de uma pasta homogênea.

2.2 Modelo de empacotamento de partículas, CPM

O modelo CPM (do inglês, Compressible Packing Model), proposto por De Larrard [16], tem como objetivo prever a densidade de empacotamento de misturas polidispersas. Este modelo se baseia em três parâmetros:

- O tamanho dos grãos componentes de cada classe do conjunto, descrito nas curvas granulométricas dos materiais;
- A forma dos grãos, considerada indiretamente a partir da densidade de empacotamento de cada uma das classes individualmente;
- O método de execução do empacotamento, ou o método de compactação utilizado no processamento das misturas.

O modelo consiste em obter o menor valor para a densidade de

empacotamento virtual γ , por meio da equação (4), onde β_i e β_j são as densidades de empacotamento de cada classe e y_j é o volume de material de cada classe.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_j + b_{ij} \times \beta_j \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \times y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \times \frac{\beta_j}{\beta_i} \right] \times y_j} \quad (4)$$

O modelo depende também da determinação dos valores do efeito de afastamento a_{ij} e efeito parede b_{ij} conforme apresentado nas equações (5) e (6). Esses efeitos consistem na interação dos grãos. O primeiro ocorre quando se introduz, entre as partículas maiores, um grão que seja maior que o espaço vazio existente, produzindo o efeito de afastamento dos grãos de maior tamanho (Figura 3). Já o efeito parede, ocorre quando for inserida uma partícula maior entre as partículas menores dominantes. A parede do grão de maior tamanho impedirá que as partículas menores se aproximem nesta área, dessa forma reduzindo o volume de sólidos na região (Figura 4) [16].

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (5)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,50} \quad (6)$$

Por fim, ao considerar o método de compactação utilizado no processamento da mistura granular é possível obter a densidade de empacotamento real Φ . Isso é feito através do coeficiente K conforme dado pela equação (7). O autor do modelo apresenta um estudo em que atribui diferentes valores para K associando estes valores aos métodos de compactação mais comumente

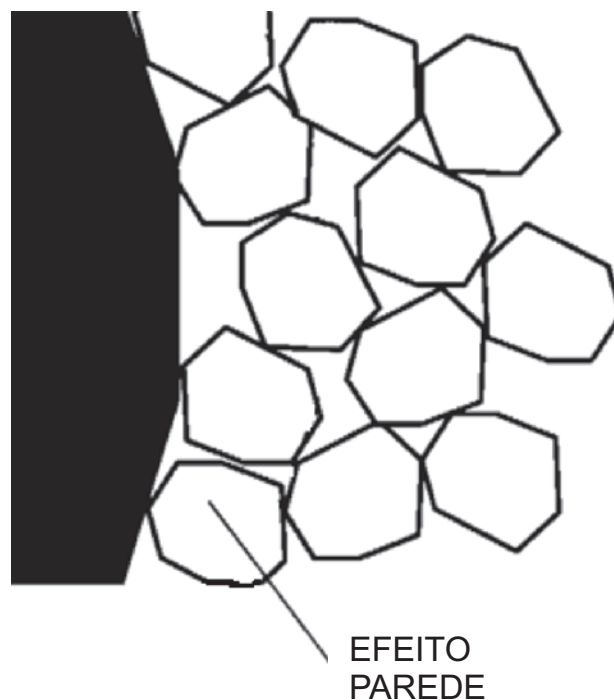


Figura 4
Efeito parede (adaptado de [16])

usados no processamento de misturas de pastas, argamassas e concretos [16].

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} + \frac{1}{Y_i}} \quad (7)$$

3. Materiais e método

3.1 Materiais

Para a produção das pastas estudadas, utilizou-se o cimento Portland, o pó de pedra e a sílica ativa. Esta última foi incorporada com o intuito de compensar possíveis perdas de resistência associadas ao uso do pó de pedra, considerando possível aplicação dos resultados obtidos neste estudo para a produção futura de concretos, inclusive concretos de alta resistência. A sílica ativa é uma adição mineral pozolânica que apresenta partículas finas e arredondadas. Esta adição pode colaborar para a densificação das pastas, dado que suas partículas são cerca de 100 vezes menores que as do cimento [20]. As dosagens de sílica ativa encontram-se normalmente entre 5 a 15% da massa de cimento. Valores acima disso levam a aumentos consideráveis no custo final do concreto e menor ganho de resistência [20; 21; 22; 23; 24]. Para o presente trabalho, o teor de sílica ativa foi fixado em 8% da massa de finos, que equivale a 11%, em volume. Este valor foi definido em estudos anteriores [6; 25].

Foi utilizado o cimento Portland CP V ARI, que obedece às especificações da norma NBR 5733 [26]. O pó de pedra foi obtido pelo processo de britagem da areia artificial, proveniente do calcário em suspensão na água. O material foi coletado e posteriormente seco em estufa no laboratório à temperatura de 60°C. A Tabela 1 apresenta as massas específicas e os diâmetros médios dos três materiais. O aditivo químico utilizado consiste em um superplastificante de terceira geração, baseado em polímeros de éteres carboxílicos modificados. Cabe destacar que o mesmo atende aos requisitos da NBR 11768 [27] e sua massa específica é igual a 1.100 kg/m³, dado do fornecedor.

Como o objetivo do presente trabalho é analisar a influência da substituição do cimento pelo pó de pedra, a Figura 5 apresenta as curvas granulométricas dos dois materiais, obtidas pela distribuição granulométrica à laser. O equipamento consiste em um granulômetro à laser marca CILAS, modelo 1064. Foi utilizado como líquido dispersante o álcool isopropílico, sendo as amostras submetidas a 1 minuto de ultrassom antes do início do ensaio. Observa-se que o cimento é mais fino que o pó de pedra, sendo que o segundo apresenta uma faixa mais ampla de tamanho de partículas. Comparando o diâmetro médio dos três materiais (Tabela 1), a sílica ativa é a mais fina, resultando no efeito filer característico do material.

3.2 Método

3.2.1 Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante

A determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante (SP) foi realizada para cada material fino. Os ensaios realizados fo-

Tabela 1

Características físicas do cimento, da sílica ativa e do pó de pedra

| Parâmetros | Características físicas | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| | Cimento | Sílica ativa | Pó de pedra |
| Massa específica (kg/m ³) | 3,000 | 2,200 | 2670 |
| Diâmetro médio (µm) | 7,97 | 0,2 | 40,43 |

ram o do mini cone de Kantro [28] e o do cone de Marsh [29]. Na análise do ponto de saturação do aditivo para o cimento Portland, a relação a/s foi definida em 0,3 e mantida constante, isto porque, ensaios pilotos foram realizados variando a relação a/s em 0,2; 0,3; 0,4; 0,5, sendo que o teor 0,3 apresentou pastas com consistência adequada para a realização dos ensaios. Os teores de SP ensaiados foram 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,2% e 1,5%, em relação à massa de cimento. Para o pó de pedra foi possível manter a relação a/s e os teores de SP utilizados no cimento, proporcionando consistência similar. Entretanto, para a sílica ativa, os ensaios foram executados com a relação a/s de 0,4 até 1 e o teor de SP de 0% até 3%.

3.2.2 Determinação da densidade de empacotamento dos materiais finos

O ensaio para a determinação da densidade de empacotamento consiste na aplicação do método proposto por [14], que prevê a produção de pastas com diferentes relações a/s para cada um dos materiais estudados. As pastas foram compostas pelo material fino, pela água e pelo aditivo superplastificante.

A Tabela 2 apresenta o procedimento de mistura dos materiais em argamassadeira para a produção das pastas. Verifica-se que, inicialmente, adicionou-se 50% do material fino, 80% da água e 80% do aditivo superplastificante à argamassadeira, realizando em seguida a mistura em velocidade baixa por 3 minutos. As quantidades remanescentes de cada material, 50% do material fino, 20% da água e 20% do aditivo SP, foram fracionadas em quatro partes iguais e adicionadas à argamassadeira em diferentes momentos. Após cada adição de material, a pasta era misturada em velocidade baixa por 2 minutos. Ao final do processo, a totalidade dos

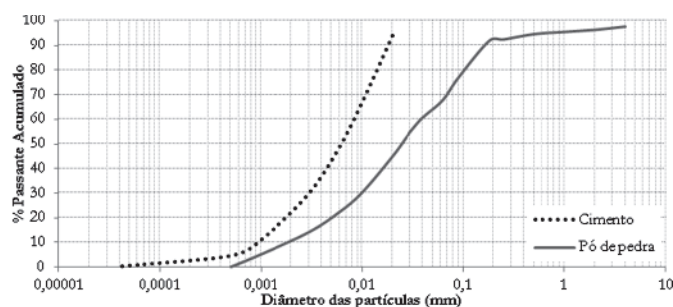


Figura 5
Distribuição granulométrica do cimento e do pó de pedra

Tabela 2

Procedimento de mistura das pastas – adaptado de [14]

| Etapa da mistura | Materiais | Tempo de mistura | Velocidade |
|------------------|---------------------------------|------------------|------------|
| 1 ^o | 50% Sólidos + 80% Água + 80% SP | 3 min, | Baixa |
| 2 ^o | 12,5% Sólidos + 5% Água + 5% SP | 2 min, | Baixa |
| 3 ^o | 12,5% Sólidos + 5% Água + 5% SP | 2 min, | Baixa |
| 4 ^o | 12,5% Sólidos + 5% Água + 5% SP | 2 min, | Baixa |
| 5 ^o | 12,5% Sólidos + 5% Água + 5% SP | 2 min, | Baixa |

materiais havia sido adicionada à mistura, que foi realizada em um tempo total de 11 minutos.

Após a mistura, a pasta foi colocada em um recipiente cilíndrico de volume conhecido, igual a 400 ml, para a determinação da massa. O recipiente foi preenchido em três camadas, sendo cada camada compactada com 30 golpes aplicados com um soquete.

3.2.3 Determinação da proporção ótima de cimento Portland e pó de pedra em pastas

A proporção ótima da mistura entre os materiais finos estudados foi determinada a partir do método CPM, proposto por [16]. A substituição do cimento Portland por pó de pedra foi feita em teores iguais a 0%, 6%, 12% e 18%, em massa, o que equivale a porcentagens de substituição iguais a 0%, 7%, 14% e 21%, em volume. A bibliografia aponta que valores superiores aumentam excessivamente a demanda de água [6; 30; 31; 32]. A porcentagem de sílica ativa manteve-se constante, conforme descrito anteriormente, igual a 11%, em volume. Para cada um dos teores de substituição do cimento por pó de pedra foi determinada a densidade de empacotamento analiticamente, pelo modelo CPM. Os parâmetros de entrada para este modelo estão apresentados na Tabela 3. Cabe destacar que para a aplicação do modelo os teores de cada material são analisados em volume. O valor de K utilizado foi de 6,7, correspondente à compactação a na presença de água.

A fim de comparar os resultados obtidos pelo uso do modelo CPM com dados experimentais, assim como determinar a relação a/s ótima para as misturas, as combinações também foram reproduzidas experimentalmente. A densidade e empacotamento foi então determinada segundo método proposto por [14].

3.2.4 Determinação da influência do excesso de água na consistência de pastas

Por fim, buscou-se avaliar a influência do excesso de água na consistência das pastas produzidas com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, nos mesmos teores avaliados

Tabela 3

Variáveis aplicadas no método CPM (em volume)

| Variável | Cimento | Pó de pedra | Sílica ativa |
|------------------------------|------------------------|--------------------|--------------|
| Fração volumétrica | 0,89; 0,82; 0,75; 0,68 | 0; 0,7; 0,14; 0,21 | 0,11 |
| Diâmetro das partículas (µm) | 7,97 | 40,43 | 0,20 |

anteriormente. O teor de superplastificante utilizado na mistura dos três materiais foi de 0,9%, em relação ao total de finos, valor que corresponde ao ponto de saturação do aditivo para o cimento Portland. Este teor de aditivo foi o mais alto encontrado para os materiais estudados, salvo a sílica ativa, que apresentou uma demanda bastante elevada do aditivo superplastificante. Explicações mais detalhadas acerca da escolha do ponto de saturação a ser utilizado são dadas no item 4.1. O teor de sílica ativa foi o mesmo utilizado na análise da densidade de empacotamento experimental dos materiais finos. Considerando, então, que a densidade de empacotamento experimental é obtida em pastas cuja demanda de água é a mínima necessária para molhar os grãos componentes da mistura [9; 17] é possível calcular o volume de excesso de água. Este é igual à diferença entre o volume total de água usado nas misturas (valor usado nas misturas que passaram pelo ensaio de consistência) e o volume correspondente à demanda de água mínima. Para a realização dos ensaios de consistência das pastas, a relação a/s foi definida em 0,3, em massa, e foi mantida constante para todas as misturas. Assim, variando apenas o teor de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra foi possível analisar a influência na consistência para uma mesma relação a/s. O método utilizado para a análise da consistência das pastas produzida foi o mini cone de Kantro [28].

4. Resultados e discussão

4.1 Ponto de saturação do aditivo superplastificante

As pastas produzidas sem o aditivo superplastificante não ofereceram a fluidez necessária para a realização dos ensaios, para os três materiais finos estudados. Os resultados do ponto de saturação do aditivo com o cimento, obtidos no mini cone de Kantro e no cone de Marsh estão apresentados na Figura 6. Observa-se na Figura 6 que os espalhamentos obtidos no mini cone de Kantro aumentaram até o teor de 0,9% de aditivo. Para teores superiores do aditivo, os espalhamentos passaram a diminuir. Similarmente, observa-se que até o teor de 0,9% de SP os tempos de escoamento das pastas pelo cone de Marsh foram sendo reduzidos gradativamente. Para teores superiores do aditivo, os tempos de escoamento voltaram a aumentar. Logo, verifica-se que o ponto de saturação do aditivo superplastificante utilizado é igual a 0,9% para o cimento Portland.

A Figura 7 apresenta os resultados do ponto de saturação do aditivo com o pó de pedra, pelos ensaios do mini cone de Kantro e do cone de Marsh.

Observa-se na Figura 7 que o espalhamento obtido no mini cone de Kantro aumentou significativamente quando o teor do aditivo

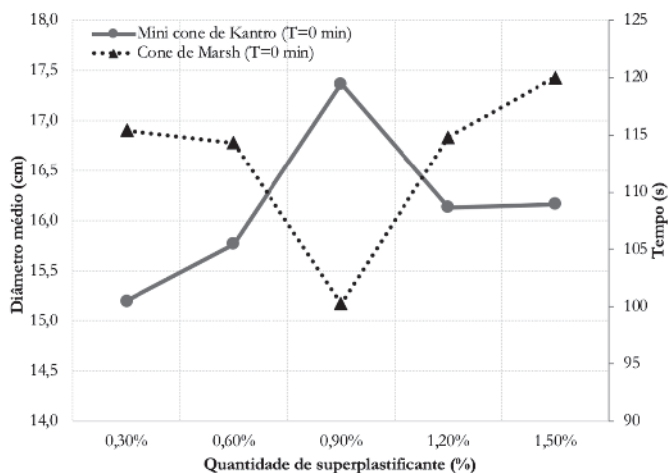


Figura 6
Resultados da compatibilidade cimento e SP no mini cone de Kantro e no cone de Marsh

superplastificante foi aumentado de 0,3% para 0,6%. Para teores superiores do aditivo, não observou-se aumento significativo do espalhamento ao se realizar o ensaio do mini cone de Kantro. Da mesma forma, os ensaios com o cone de Marsh mostram uma redução importante no tempo de escoamento da pasta ao se aumentar o teor de aditivo de 0,3% para 0,6%. O mesmo não foi observado para teores superiores, dado que os tempos de escoamento passaram a ser levemente mais altos do que o encontrado para o teor de aditivo igual a 0,6%. Este resultado já era esperado, dado que o pó de pedra é um material mais grosso que o cimento Portland (ver Tabela 1). Conseqüentemente, este apresenta uma superfície específica menor a ser coberta pelo aditivo, em comparação ao cimento, o que resulta em um ponto de saturação mais baixo.

Já para a sílica ativa, não foi possível manter a relação a/s e os teores de SP utilizados no cimento e no pó de pedra. A sílica ativa apresenta uma superfície específica bastante superior que a do

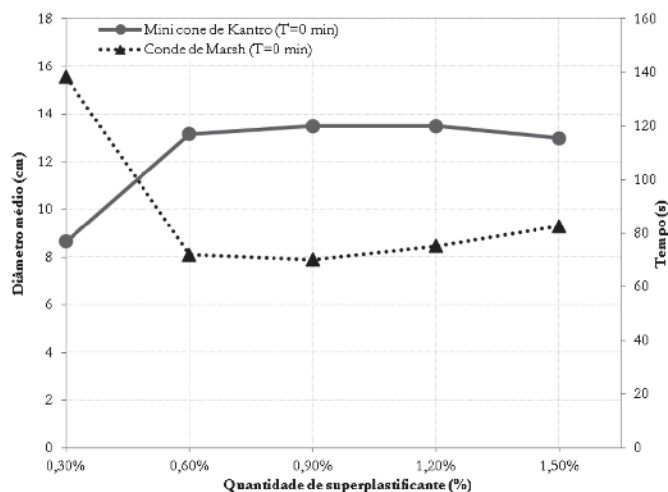


Figura 7
Resultados da compatibilidade pó de pedra e SP no mini cone de Kantro e no cone de Marsh

cimento e do pó de pedra, o que resultou em uma maior demanda de água.

No caso da sílica ativa, aumentou-se gradativamente o teor de aditivo superplastificante até se chegar ao valor de 3%, e mesmo assim não obteve-se fluidez da mistura. A Figura 8 ilustra essa situação. Ou seja, com 3% de aditivo a pasta não escoou pelo cone de Marsh e não havia abertura pelo cone de Kantro, ficando o diâmetro da abertura com a medida do próprio cone. Este valor de 3% é uma porcentagem elevada de aditivo, visto que a recomendação máxima do fabricante é de 2,0%. A necessidade de teores elevados do aditivo foi observada devido à finura da sílica ativa e sua elevada superfície específica, demandando uma grande quantidade de aditivo para fluir (superior a 3%).

Ressalta-se, porém, que a ideia de determinar um teor ótimo de substituição do cimento por pó de pedra é válida apenas se for considerada uma possível aplicação em concretos. Para que essa



Figura 8
Pasta de sílica ativa, com relação a/s igual a 1 e teor de aditivo superplastificante igual a 3% m.c.

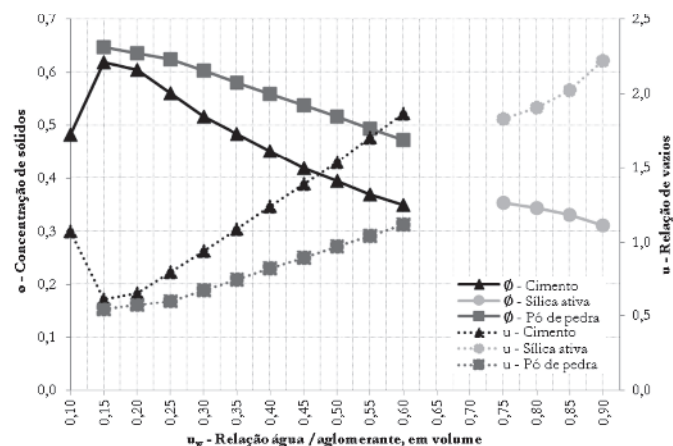


Figura 9 Resultados de concentração de sólidos e da relação de vazios das pastas produzidas com cimento Portland, pó de pedra e sílica ativa, individualmente

aplicação seja viável, é importante que o teor de aditivo superplastificante usado não seja demasiado elevado, pois isto implicará na elevação do custo do metro cúbico dos concretos produzidos, o que inviabilizaria o uso. A manutenção do teor de aditivo dentro dos limites recomendados pelo fabricante colabora, também, para uma maior aceitação do mercado no uso deste produto para concretos. Por isso, então, não foi dada continuidade nos ensaios de determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante usado no estudo com a sílica ativa, já que não seria viável utilizar teores superiores a 3% deste aditivo na produção de concretos. Diante disso, optou-se por fixar o teor do aditivo superplastificante em 0,9% sobre a massa total de sólidos, sendo este o segundo maior valor encontrado. Optou-se por fixar um teor único de aditivo, dado que os três materiais farão parte da mesma mistura. Sabe-se que este caminho escolhido não garante total dispersão dos materiais finos na mistura, pois apesar de atender ao ponto de saturação do cimento e do pó de pedra, o aditivo não será suficiente para cobrir a superfície de todos

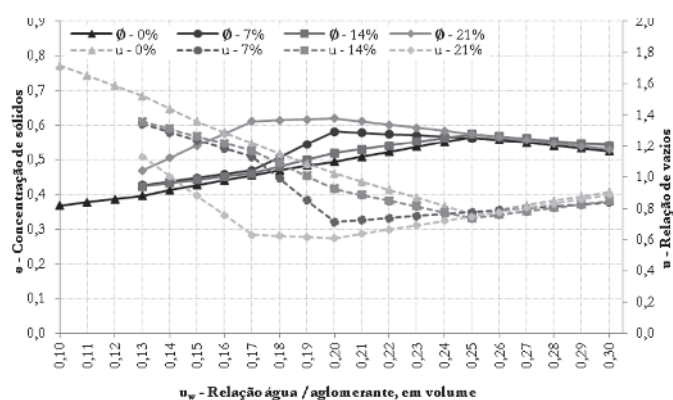


Figura 10 Resultados de concentração de sólidos e da relação de vazios das pastas produzidas com cimento Portland, pó de pedra e sílica ativa

os grãos, dada a presença da sílica ativa. Logo, haverá aglomerações nas misturas produzidas. Apesar deste problema, os resultados obtidos representam o empacotamento das partículas finas tal como seria encontrado em uma condição real, possibilitando que as pastas estudadas sejam futuramente usadas na produção de concretos, inclusive concretos de alta resistência, dada a presença da sílica ativa.

4.2 Densidade de empacotamento dos materiais finos

Os resultados de concentração de sólidos e relação de vazios dos materiais finos estudados, obtidos por [14], estão apresentados na Figura 9. A densidade de empacotamento ótima, com a relação a/s correspondente, são dados na Tabela 4. Observe-se que os resultados apresentados na Tabela 4 são correspondentes à máxima concentração de sólidos obtida para cada material, sendo este valor igual à densidade de empacotamento experimental. A relação de vazios mínima e a relação a/s são, também, correspondentes à máxima concentração de sólidos. Ao analisar individualmente os materiais finos estudados, Tabela 4, nota-se a relação inversa entre a densidade de empacotamento e a relação de vazios. No caso do cimento, a densidade de empacotamento igual a 0,610 corresponde a uma relação de vazios igual a 0,639, sendo esta a relação de vazios mínima encontrada com a relação a/s de 0,15. Para valores abaixo de 0,15, a quantidade de água na mistura foi insuficiente para molhar a totalidade das partículas componentes. Já para valores acima de 0,15 observa-se excesso de água entre as partículas, reduzindo a concentração de sólidos e aumentando a relação de vazios conforme a relação a/s aumenta. Ou seja, acima do teor ideal de água, as partículas se distanciam, aumentando a quantidade de ar entre elas e, conseqüentemente, reduzindo a concentração de sólidos, mensurada pela densidade aparente. O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao pó de pedra, que obteve a densidade de empacotamento de 0,655, correspondente a uma relação de vazios igual a 0,527 e uma relação a/s igual a 0,17. Entretanto, ao analisar a sílica ativa, observa-se uma densidade de empacotamento de 0,354, inferior às demais. Por outro lado, a relação de vazios de 1,828 é bastante superior às outras encontradas. A relação de vazios superior à unidade indica que na mistura de sílica ativa há mais vazios do que sólidos, provavelmente devido a elevada formação de aglomerados. Além disso, as curvas para a sílica ativa (Figura 9) destacam a necessidade de uma quantidade de água (a/s) superior para se obter a densidade de empacotamento. Isso pode ser explicado pela elevada finura da sílica ativa. A demanda de água é função da superfície específica das partículas: quanto maior a superfície específica das particu-

Tabela 4 Densidade de empacotamento experimental dos materiais finos estudados

| Material | Densidade de empacotamento experimental (ϕ máxima) | Relação de vazios (u mínima) | Relação a/s ideal |
|------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Cimento Portland | 0,610 | 0,639 | 0,15 |
| Pó de pedra | 0,655 | 0,527 | 0,17 |
| Sílica ativa | 0,354 | 1,828 | 0,75 |

Tabela 5
Avaliação do excesso de água

| Substituição de cimento por pó de pedra (em volume) | Consumo de material para a análise da consistência | | | | | Consumo de água para a concentração máxima de sólidos (m ³) | Excesso de água (m ³) |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| | Cimento (m ³) | Sílica ativa (m ³) | Pó de pedra (m ³) | SP (m ³) | Água (m ³) | | |
| 0% | 0,462 | 0,057 | 0,000 | 0,013 | 0,467 | 0,39 | 0,08 |
| 7% | 0,430 | 0,057 | 0,035 | 0,013 | 0,465 | 0,31 | 0,16 |
| 14% | 0,398 | 0,057 | 0,069 | 0,013 | 0,463 | 0,39 | 0,08 |
| 21% | 0,366 | 0,056 | 0,103 | 0,013 | 0,461 | 0,31 | 0,15 |

las, mais água será necessária para molhá-las. Considerando, então, que a densidade de empacotamento é obtida quando todas as partículas do sistema estão molhadas, é natural que a quantidade de água demandada pela sílica ativa seja superior à demandada pelo cimento e pelo pó de pedra. Além disso, nos aglomerados das partículas de sílica ativa também existe também ar aprisionado, o que conduz a uma elevada relação de vazios [33].

Comparando os materiais, a partir da Tabela 4, observa-se que a maior densidade de empacotamento, conseqüentemente a menor relação de vazios, foi obtida para o pó de pedra. Já a sílica ativa obtve a menor densidade de empacotamento dentre os materiais estudados. O cimento Portland apresentou valores intermediários dentre os três materiais. Essas diferenças de densidade de empacotamento já eram esperadas, devido à diferença de diâmetro médio dos materiais e da distribuição granulométrica. Nota-se, na Tabela 1, que o pó de pedra apresenta o maior diâmetro médio entre os materiais finos (mais de 5 vezes o diâmetro do cimento Portland e 200 vezes da sílica ativa). Conseqüentemente, o pó de pedra apresenta menos aglomeração entre as partículas, logo, é o material com menos espaços vazios e maior densidade de empacotamento, dentre os três materiais finos estudados. Comparado com o cimento, o pó de pedra apresenta uma faixa de tamanho de partículas mais ampla, assim os grãos menores preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores, sucessivamente. Com o mesmo raciocínio, a sílica ativa apresenta uma densidade de empacotamento inferior às demais, pois em pequenas partículas a relação entre área superficial e volume é maior, o que faz com que as forças de atração entre grãos sejam dominantes, favorecendo a formação de aglomerados [12; 34], resultando no aumento dos vazios entre as partículas e, conseqüentemente, redução na densidade de empacotamento.

4.3 Proporção ótima entre o cimento Portland e o pó de pedra

A determinação da proporção ótima entre o cimento Portland e o pó de pedra foi feita por meio do modelo CPM [16], e, paralelamente, por meio do método experimental proposto por [14]. A Figura 10 apresenta os resultados de concentração de sólidos e da relação de vazios para as pastas produzidas com cimento Portland, pó de pedra e sílica ativa, segundo [14]. A proporção de sílica ativa foi fixada em 11%, em volume. A proporção de pó de pedra variou em 0, 7, 14 e 21%, em volume, em substituição ao cimento. Ressalta-se que a máxima concentração de sólidos de cada pasta representa a densidade de empacotamento experimental da mistura. Este valor é, então, comparado com a densida-

de de empacotamento obtida pelo modelo CPM [16] na Figura 11. Nota-se pela Figura 11 que a proporção com maior substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, igual a 21% em volume, foi a que obteve a maior densidade de empacotamento tanto pelo modelo CPM como pelo método experimental. Esse resultado é muito positivo, já que a substituição do cimento por pó de pedra em proporções elevadas apresenta vantagens econômicas e ambientais. Verifica-se ainda que os valores teóricos e experimentais de densidade de empacotamento são bastante próximos, com uma divergência máxima entre estes igual a 4,8%, para o caso de 14% de pó de pedra em substituição ao cimento. Isso demonstra a efetividade do modelo CPM [16] quando aplicado a pastas de cimento. Ao se comparar os resultados da Figura 11 com os apresentados anteriormente na Tabela 4, verifica-se que através do modelo teórico foram obtidas densidades de empacotamento para a mistura dos três materiais (cimento, pó de pedra e sílica ativa) superiores às obtidas para os materiais individualmente. Isso demonstra que granulometrias complementares levam a maiores densidades de empacotamento. Entretanto, ao se comparar as densidades experimentais das misturas e dos materiais individuais, nota-se que o pó de pedra obteve uma densidade de empacotamento superior às misturas. Isso se deve a uma distribuição granulométrica mais ampla do mesmo, auxiliando no preenchimento dos vazios.

4.4 Influência do excesso de água na consistência de pastas

A composição das pastas produzidas com substituição do cimento Portland por pó de pedra e avaliadas através do mini cone de Kantro estão apresentadas na Tabela 5, assim como o consumo de água

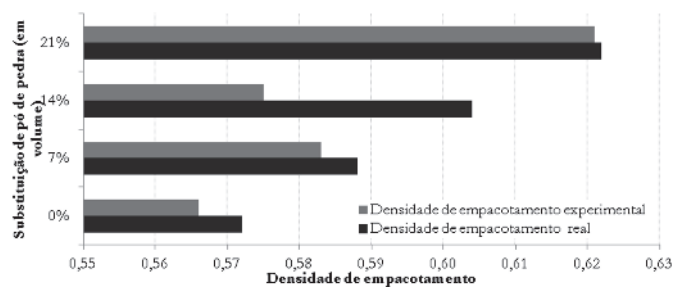


Figura 11
Densidade de empacotamento experimental e analítica de cada teor de substituição do cimento pelo pó de pedra

para a concentração máxima de sólidos e o excesso de água para cada pasta.

A relação entre o excesso de água e a consistência das pastas produzidas para os quatro teores de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, está apresentada na Figura 12.

Observa-se na Figura 12 que a fluidez obtida no mini cone de Kantro cresceu com o acréscimo do teor de pó de pedra. Com o volume de pasta mantido constante, a utilização de materiais com diferentes granulometrias aumentou o teor de água em excesso. Como o excesso de água é o responsável pela lubrificação da pasta, uma densidade de empacotamento mais elevada dos materiais cimentícios para um determinado volume de água, melhora a fluidez. Como consequência, há uma melhor dispersão entre as partículas e um aumento da trabalhabilidade da mistura [35; 36]. Nota-se que o excesso de água para os teores de 0% e 14% de pó de pedra foram inferiores que 7% e 21%. A pasta produzida com 0% de pó de pedra apresentou maior quantidade de finos (cimento Portland e sílica ativa), já que não apresenta o pó de pedra em sua composição. Esta apresentou também a menor fluidez dentre as pastas estudadas. Isso se deve à maior superfície específica dos finos, em maior quantidade nesta mistura, o que eleva a demanda de água necessária para molhar as partículas, de modo que a água não se encontra disponível para colaborar com a fluidez da mistura. Quando se incorpora o pó de pedra às pastas na proporção de 7% de substituição do cimento pelo pó, reduz-se a porcentagem de finos na mistura e, conseqüentemente, a superfície específica das partículas também reduz. Isso diminui a demanda de água necessária para molhar as partículas, o que deixa mais água disponível para promover fluidez. Além disso, a maior densidade de empacotamento desta pasta faz com que o volume de água necessário para preencher os vazios entre grãos seja menor, o que também colabora para o aumento do excesso de água. Porém, a pasta produzida com 14% de substituição de cimento por pó, apresentou menor excesso de água em comparação à com 7% de substituição. Logo, esse teor apresentou mais vazios e demandou mais água. O que já havia sido observado na densidade de empacotamento experimental (Figura 11).

Observa-se, na Figura 11 e Figura 12, que o teor de 21% de substituição obteve a maior densidade de empacotamento, experimental e analítica e teve um excesso de água maior que no teor de 14%, conforme esperado. Nesse caso, a densidade de empaco-

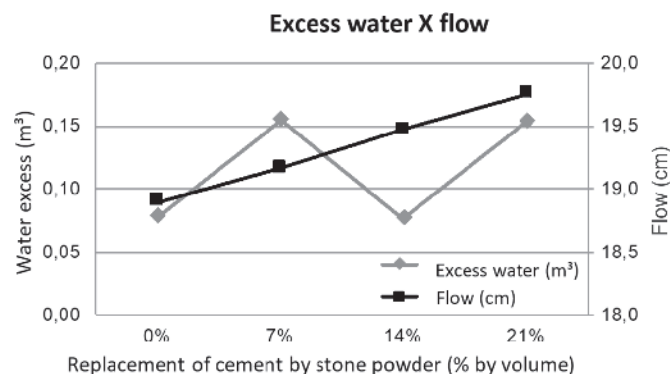


Figura 12

Relação entre o excesso de água e a consistência das pastas produzidas

tamento é maior, resultando em uma menor demanda de água e maior trabalhabilidade.

5. Conclusões

A partir do programa experimental desenvolvido e dos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O cimento apresentou um ponto de saturação igual a 0,9% e o pó de pedra, sendo o material mais grosso, demandou uma menor quantidade de aditivo, com ponto de saturação igual a 0,6%. Para a sílica ativa não é plausível a realização do ensaio, já que demandaria um teor de SP muito superior que dos demais materiais e que o recomendado pelo fabricante.
- O pó de pedra apresentou o maior valor de densidade de empacotamento, quando os materiais foram analisados separadamente, devido a uma distribuição granulométrica mais ampla do mesmo.
- De acordo com os resultados obtidos pela aplicação do modelo CPM [16] e do método experimental [14], a composição de pasta com 68% de cimento Portland, 21% de pó de pedra e 11% de sílica ativa, em volume, foi a que apresentou a maior densidade de empacotamento de partículas. Isso corresponde a valores de 74% de cimento Portland, 18% de pó de pedra e 8% de sílica ativa, em massa.
- Devido à elevada finura das partículas de sílica ativa, a densidade de empacotamento deste material foi bastante inferior que à do cimento e do pó de pedra. Isso ocorreu devido a maior superfície específica da sílica ativa, levando a necessidade de mais água para molhá-la. Além disso, partículas mais finas estão mais suscetíveis a efeitos de aglomeração, já que em pequenas partículas a área superficial em relação ao volume é maior, o que faz com que as forças de atração sejam dominantes frente às forças gravitacionais. Logo, quanto mais finas as partículas, maior o efeito da aglomeração. Entre os aglomerados das partículas de sílica ativa também existem ar aprisionado, levando a uma elevada relação de vazios.
- Os valores de densidade de empacotamento obtidos analiticamente para as misturas dos materiais, pelo modelo CPM [16], foram superiores aos valores de densidade de empacotamento experimental obtidos para cada material individualmente. Isso demonstra que granulometrias complementares, ou uma maior amplitude de tamanho de grãos no conjunto, levam a maiores densidades de empacotamento.
- A fluidez das pastas produzidas aumentou com o acréscimo do teor de pó de pedra. O excesso de água é o responsável pela lubrificação da pasta, logo uma densidade de empacotamento mais elevada, para um determinado volume de água, melhora a fluidez.
- O maior teor de substituição do cimento pelo pó de pedra, 21% em volume e 18% em massa, obteve a maior densidade de empacotamento, experimental e analítica e a maior trabalhabilidade, possibilitando vantagens econômicas e ambientais.

6. Agradecimentos

Às empresas Itambé, Grace e Concrebrás, que gentilmente forneceram todos os materiais necessários à produção das pastas

estudadas. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de elaboração da presente pesquisa.

7. Referências bibliográficas

- [1] Barbosa, M. T. G.; Coura, C. V. G.; Mendes, L. D. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. *Revista Ambiente Construído*, vol. 8, no. 4, p. 51–60, 2008.
- [2] Balagol, B.; Kulkarni, S. A.; Bajoria, K. M. Strength and durability of concrete with crushed sand. In *27th Conf. Our World Concr. Struct.* 29 - 30 August 2002, Singapore, vol. 158, no. SB3, p. 191–199, 2002.
- [3] Gonçalves, J. P.; Tavares, L. M.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R.; Cunha, E. R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 6, p. 924–932, 2007.
- [4] Campos, H. F.; Marques Filho, J.; Oliveira, D. R. B. Determinação do teor ótimo de superplastificante na pasta de cimento Portland produzida com substituição parcial do aglomerante pelo pó de pedra existente nas areias artificiais. *Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto*, p. 1–13, 2015.
- [5] Jonh, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2.
- [6] Campos, H. F. Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do Cimento Portland: Estudo experimental. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil)*, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015.
- [7] Almeida, S. L. M.; Silva, V. Areia artificial : uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: *II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem*. São Paulo, p. 10, 2005.
- [8] Andriolo, F. R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. In: *II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem*. São Paulo, p. 1, 2005.
- [9] Ji, T.; Chen, C. Y.; Zhuang, Y. Z.; Chen, J. F. A mix proportion design method of manufactured sand concrete based on minimum paste theory. *Construction and Building Materials*, vol. 44, p. 422–426, 2013.
- [10] Berndt, M. L. Influence of concrete mix design on CO₂ emissions for large wind turbine foundations. *Renew. Energy*, vol. 83, p. 608–614, 2015.
- [11] Relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2013.
- [12] De 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*, vol. 55, no. 333, p. 18–32, 2009.
- [13] Damineli, B. L. Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. *Tese (Doutorado em Engenharia)*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [14] Wong, H. H. C.; Kwan, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method. *Materials and Structures*, vol. 41, no. 4, p. 689–701, 2008.
- [15] Fennis, S. M.; Walraven, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Heron.*, vol. 57(2), p. 73–101, 2012.
- [16] De Larrard, F. *Concrete mixture proportioning: A Scientific Approach*. Modern Concrete Technology Series, v. 9. E & FN SPON, London, 1999.
- [17] Klein, N. S. El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland. *Tese (Doutorado em Engenharia Civil)*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [18] Li, L. G.; Kwan, A. K. H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. *Cement and Concrete Composites*, vol. 39, p. 33–42, 2013.
- [19] Fennis, S. M. Design of ecological concrete by particle packing optimization. *Tese (Doutorado em Engenharia Civil)*, Delft University of Technology, Holanda, 2011.
- [20] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. Report on High-Strength Concrete - ACI Committee 363, 2002.
- [21] Khan, M. I. Isoresponses for strength, permeability and porosity of high performance mortar. *Building and Environment*, vol. 38, p. 1051–1056, 2003.
- [22] Mazloom, M.; Ramezani-pour, A. A.; Brooks, J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, p. 347–357, 2004.
- [23] Wong, H. S.; Abdul Razak, H. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, p. 696–702, 2005.
- [24] Wongkeo, W.; Thongsanitgarn, P.; Ngamjarujana, A.; Chai-panich, A. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials and Design*, vol. 64, p. 261–269, 2014.
- [25] Mendes, S. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. *Dissertação. (Mestrado em Construção Civil)*, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2002.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland de alta resistência inicial. - NBR 5733, Rio de Janeiro, 1991.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aditivos para concreto de cimento Portland. - NBR 11768, Rio de Janeiro, 2011.
- [28] Kantro, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste: A Miniature Slump Test. *Cement and Concrete Aggregates*, vol. 2, p. 95–102, 1980.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Calda de cimento para injeção. - NBR 7681, Rio de Janeiro, 2013.
- [30] Campos, H. F.; Marques Filho, J. Análise da trabalhabilidade e da resistência à compressão de argamassas produzidas com substituições parciais da areia artificial por pó de pedra. *Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto*, p. 1–16, 2015.
- [31] Polucha, A. Estudo experimental de concreto auto adensável utilizando areia 100% artificial e filer calcário como

- substituição parcial do cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2016.
- [32] Hoffmann, L. Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência de concretos convencionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015.
- [33] Hermann, A.; Langaro, E. Lopes da Silva, S. H.; Klein, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. *Revista Ibracon Estruturas e Materiais*, vol. 9, no. 1, p. 48–65, 2016.
- [34] Klein, N. S.; Cavalaro, S.; Aguado, A.; Segura, I.; Toralles, B. The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation. *Construction and Building Materials*, vol. 121, p. 34–43, 2016.
- [35] Wong, H. H. C.; Kwan, A. K. H. Packing density : a key concept for mix design of high performance concrete. In: *Materials Science and Technology in Engineering Conference (MaSTEC)*, pp. 1–15, 2005.
- [36] Yu, A. B.; Feng, C. L.; Zou, R. P.; Yang, R. Y. On the relationship between porosity and interparticle force. *Powder Technology*, vol. 130, no. 1–3, p. 70–76, 2003.
- [37] Wong, H. H. C.; Kwan, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 2—packing and flow of OPC + PFA + CSF. *Materials and Structures*, vol. 41, no. 4, p. 773–84, 2008.