

Aplicação da dosagem por empacotamento de partículas no UHPC com cinzas de casca de arroz

Jaqueline Andrade Corrêa
Faculdade de Engenharia Civil
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
jaqueline.ac1@puccampinas.edu.br

Lia Lorena Pimentel
Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
lialp@puc-campinas.edu.br

Resumo — A busca por materiais cada vez mais resistentes e duráveis tem despertado o interesse pelo conceito de empacotamento de partículas nas diferentes áreas da engenharia. Os modelos de empacotamento de partículas são equações matemáticas capazes de prescrever como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente até encontrar a proporção ideal de cada material. O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um dos mais recentes desenvolvimentos no campo da tecnologia do concreto. Trata-se de um material com resistência a compressão acima de 130 MPa e elevada durabilidade. Os concretos de ultra alto desempenho são relativamente caros em virtude da utilização de grandes quantidades de sílica ativa, cimento e fibras de aço. Em busca de barateamento e sustentabilidade no UHPC, pesquisas revelam que as cinzas de casca de arroz trazem resultados bem-sucedidos em resistência e durabilidade, ao mesmo tempo que reduzem o custo de produção e os problemas ambientais gerados por esse resíduo agrícola. O presente trabalho visa estudar e conhecer o processo de dosagem por empacotamento de partículas. Através do modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger e utilização do software Maple procedeu-se a simulação de uma dosagem de UHPC buscando-se substituir a sílica ativa por cinzas de casca de arroz. Observou-se que dentre as misturas avaliadas, a de consumo de cimento de 920 kg/m³ gerou uma dosagem mais próxima da curva ideal de empacotamento e pode-se concluir também, que materiais com granulometrias distintas são imprescindíveis para um bom empacotamento.

Palavras chave — dosagem, empacotamento de partículas, modelo modificado de Andreasen e Andersen, ultra high performance concrete

I. INTRODUÇÃO

A busca por materiais cada vez mais resistentes e duráveis tem despertado o interesse pelo conceito de empacotamento de partículas nas diferentes áreas da engenharia [1]. Os modelos de empacotamento de partículas são equações matemáticas capazes de prescrever como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente até encontrar a proporção ideal de cada material, por isso são desejáveis na obtenção de concretos [2]. Tais modelos calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura baseado na distribuição granulométrica e na densidade de empacotamento de um determinado grupo de partículas [1]. Sendo assim, o primeiro passo para obtenção de uma mistura de UHPC é a escolha correta de materiais ultrafinos, pois a partir dessa premissa é possível obter uma mistura com máxima compacidade e baixa porosidade [3].

O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um material que possui características mecânicas elevadas, como resistência à compressão acima de 130 MPa segundo a NF P18 470 [4], alta ductilidade, tenacidade e excelente durabilidade [5]. A alta

ductilidade está associada à incorporação de fibras metálicas, responsáveis por reduzir a fragilidade do material e impedir a fratura repentina do corpo de prova [6], por isso a NF P18-710 [7] recomenda reforço com fibras metálicas para uso estrutural no UHPC. Os materiais mais comumente utilizados na produção desse concreto são cimento Portland, sílica ativa, pó de quartzo, areia de quartzo, fibras, superplastificante baseado em éter policarboxilato e baixa relação água cimento, próximo a 0,2 [8].

Os concretos de ultra alto desempenho são relativamente caros em virtude da utilização de grandes quantidades de sílica ativa [9], cimento [10] e fibras de aço [11], matérias primas de alta qualidade. Por esse motivo é imprescindível conhecer os efeitos das interações entre os componentes do UHPC para encontrar possíveis materiais substitutos [5]. Nesse sentido, pesquisadores têm se dedicado a encontrar substitutos do cimento (parcial), pó de quartzo (total) e sílica ativa (parcial ou total) [12]. Entre os possíveis materiais substitutos encontrados estão cinzas volantes, escória granulada de alto forno, pó de vidro reciclado, pó de calcário, metacaulim e cinzas de casca de arroz ou rice husk ash (RHA) em inglês.

A sílica ativa (microsílica) é um subproduto industrial, decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício, produto utilizado em grande escala nas siderúrgicas e metalúrgicas para a produção de ligas metálicas em geral. Durante o processo fabril, realizado em altíssimas temperaturas, é gerado o gás monóxido de silício (SiO) que, ao sair do forno, oxida-se e condensa-se formando partículas muito finas de sílica amorfa (SiO₂). Esta substância é captada em filtros de mangas, e em seguida, armazenada e embalada para venda [13].

A sílica ativa tem características de grande relevância em matrizes de cimento e, em particular, no UHPC. O alto teor de SiO₂ no formato amorfo, aliado a elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento [14]. A capacidade pozolânica de reagir à temperatura normal com hidróxido de cálcio e formar silicato de cálcio hidratado (CSH) é responsável pelo ganho de resistência mecânica e redução significativa da porosidade [15], o que implica melhora na durabilidade e contribui para a sustentabilidade [16].

No entanto, a microsílica tem desvantagens significativas, como falta de disponibilidade, custo elevado e coloração escura [9], que pode influenciar na obtenção de concreto branco ou colorido por exemplo. A disponibilidade limitada está associada à demanda de mercado da indústria da construção civil. De acordo com [13] “na década de 1980 a sílica ativa já apresentava vasta aplicação na indústria da construção, e seu uso vinha

aumentando significativamente porque era preciso produzir concretos mais impermeáveis, protegidos contra a ação de cloretos, aplicáveis em ambientes marítimos como pontes e portos, e concretos mais resistentes, viabilizando a construção de grandes arranha-céus e grandes estruturas para estacionamento, onde é essencial que os pilares sejam os mais esbeltos possíveis”.

Em função de suas características e propriedades excepcionais, o material que antes era considerado resíduo industrial passou a ser muito procurado, como consequência o produto se tornou raro e caro [9], [17]. Sendo assim, uma série de estudos recomendam a substituição da sílica ativa por outro fino de menor custo, cujo valor e disponibilidade incentivariam o desenvolvimento do UHPC na indústria do concreto [9], [10], [17], [18].

De acordo com [19], o Brasil é o maior produtor e consumidor de arroz fora da Ásia. Segundo [20], das 750 milhões de toneladas de arroz produzidas anualmente, aproximadamente 160 milhões de toneladas de cascas de arroz são despejadas no meio ambiente como resíduo e se tornam causa de problema ambiental. Sabe-se que durante a combustão das cascas são geradas cinzas compostas por alto teor de sílica.

Em busca de barateamento e sustentabilidade no UHPC, pesquisas revelam que as cinzas de casca de arroz trazem resultados bem sucedidos em resistência e durabilidade, ao mesmo tempo que reduzem o custo de produção e os problemas ambientais gerados por esse resíduo agrícola [6], [12], [20]. Além das vantagens já mencionadas, a incorporação das cinzas de casca de arroz no UHPC desaccelera significativamente a diminuição da umidade relativa interna, o que implica menor retração autógena em comparação ao UHPC que contém apenas sílica ativa [21].

Em 1892, Féret publicou o primeiro tratado sobre empacotamento de partículas em concreto, onde afirmou que uma seleção adequada dos agregados está intimamente associada à resistência à compressão e à porosidade do material no estado endurecido [22]. Por isso é de fundamental

importância analisar a distribuição do tamanho de partículas ao selecionar os materiais no UHPC.

As partículas muito finas apresentam uma grande tendência à aglomeração quando entram em contato com um líquido polar como a água. Isso ocorre devido a vários tipos de interação, como as forças de Van der Waals, o que implica retenção de certa quantidade de água da mistura entre as partículas, líquido que fica indisponível para hidratar a área superficial dos materiais e fluidificar a mistura [23], por isso há perda de resistência.

A Fig. 1 apresenta a distribuição do tamanho de partículas dos materiais que constituem o UHPC, onde é possível verificar que a finura das cinzas de casca de arroz está localizada entre a sílica ativa e o cimento por exemplo. Após definir os materiais ultrafinos que estarão presentes na mistura é preciso determinar a proporção ideal de cada constituinte [3], de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim, sucessivamente [1].

II. DOSAGEM POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

A partir da publicação do primeiro estudo sobre empacotamento de partículas em concreto, de autoria de René Féret, na década de 1890, uma série de outros modelos têm sido propostos a fim de calcular a densidade de empacotamento de partículas para otimizar misturas granulares de concreto [1], [8], [23]. Dentre os fatores que podem influenciar o empacotamento estão granulometria, morfologia, porosidade interna das partículas e modo de inserção dos materiais à mistura [8],[24].

Em relação a granulometria, o tamanho das partículas pode gerar efeito de afastamento e efeito parede quando há proximidade entre os grãos. O efeito parede ocorre quando a mistura é composta por materiais com diâmetros muito diferentes, enquanto o efeito de afastamento surge quando uma partícula menor não se encaixa nos vazios entre as partículas maiores [25], como pode ser observado na Fig. 2.

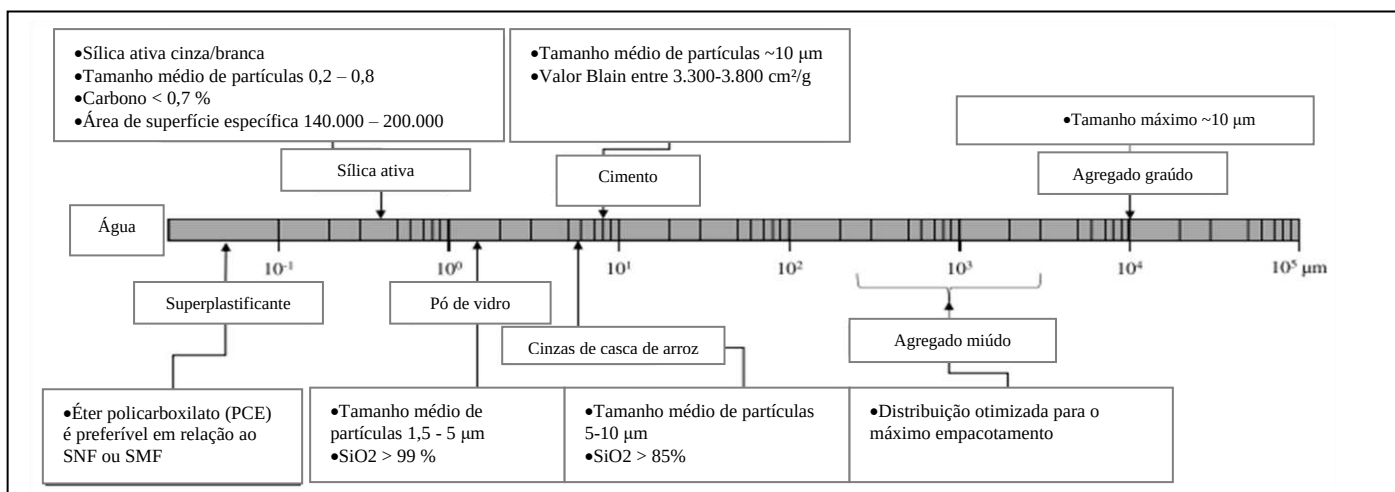


Fig. 1. Distribuição do tamanho de partículas dos materiais que geralmente contituem o UHPC. Fonte: Adaptado de [8]. * Formaldeído Melamínico Sulfonado (SMF) e Formaldeído Sulfonado de Naftaleno (SNF).

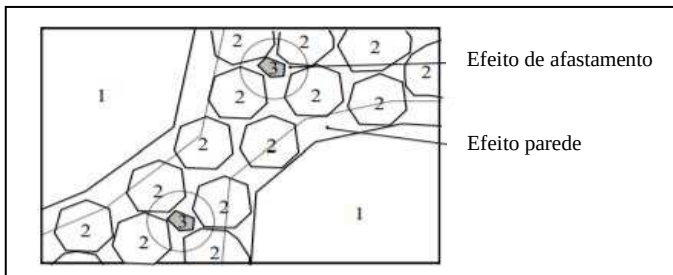


Fig. 2. Empacotamento ternário de partículas, onde a classe intermediária é dominante. O efeito parede ocorre entre as partículas 1 e 2 e o efeito de afastamento entre 2 e 3. Fonte: Adaptado de [25].

Sabe-se que o concreto é composto por materiais com diferentes morfologias (esférica, irregular ou lamelar). Quanto mais esféricas forem as partículas dos materiais, maior será o empacotamento. Isso porque as partículas não esféricas provocam maior atrito entre suas superfícies [22], [24]. No tocante a porosidade interna das partículas, sabe-se que o máximo empacotamento é atingido com a mínima porosidade, o que implica menor grau de hidratação. Dessa forma, partículas densas ou fechadas contribuem para um melhor empacotamento, enquanto partículas de porosidade aberta, que absorvem mais líquidos, resultam em empacotamento inferior [22], [24]. Quanto ao modo de inserção dos materiais na mistura, recomenda-se misturar todos os componentes secos para se obter uma mistura homogênea antes da adição de água e superplastificante [8], [24].

A. Modelos de empacotamento

Os modelos teóricos de empacotamento podem ser categorizados em dois tipos: discretos e contínuos. Os discretos consideram as partículas individualmente, enquanto os contínuos consideram que em um sistema de distribuição possam existir todos os tamanhos de partículas possíveis para um mesmo material [22] [24]. Uma vez que o modelo contínuo é o que mais tem sido utilizado para proposições de dosagem de concretos de alto e ultra alto desempenho [3], o tópico de modelos discretos será apresentado de forma sucinta.

B. Modelos discretos

René Feréti foi o primeiro a estudar a correlação entre resistência à compressão e volume de água mais ar no concreto. Em 1892, o estudioso concluiu que a resistência à compressão máxima pode ser alcançada quando os vazios na mistura são mínimos [22]. Em 1928, Furnas desenvolveu um modelo binário de empacotamento. A hipótese do autor era que a máxima densidade de empacotamento ocorreria quando apenas dois tamanhos de partículas estivessem na mistura [22], [24]. Em 1931, Furnas apresentou uma atualização do modelo, dessa vez ternário ou multicomponentes. O estudioso verificou que empacotamentos mais densos eram obtidos com três ou mais tamanhos de partículas discretas [22], [24].

C. Modelos contínuos

O primeiro modelo contínuo foi proposto por Fuller e Thompson em 1907, no qual o máximo empacotamento era calculado conforme (1) [8]

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^q \quad (1)$$

em que P é a porcentagem acumulada passante pela peneira com abertura D ; $D_{\max}$ o tamanho máximo de partícula da mistura; D o diâmetro da partícula (μm); q o coeficiente de distribuição, definido pelos autores em 0,5 [8].

O segundo modelo foi proposto por Andrasen & Andersen, em 1930, a partir de estudos baseados no modelo anterior, também fornecido pela Equação 1. Os autores propuseram um valor de q entre 0,33 e 0,5 e descobriram de forma empírica que o melhor empacotamento era obtido quando q era igual a 0,37. Dessa forma a curva com $q=0,37$ corresponde a curva de A&A [3], [8].

O último modelo desenvolvido e que mais tem sido utilizado para otimização dos concretos de alto e ultra alto desempenho é o modelo de Alfred, também conhecido como modelo de Andrasen & Andersen modificado, proposto por Funk e Dinger em 1980 [8].

Funk e Dinger propuseram que qualquer distribuição de tamanho real de partículas deve ter um limite de tamanho inferior e finito, por isso incorporaram o tamanho mínimo de partícula ($D_{\min}$) na curva de empacotamento ideal, definida por (2). Os autores também indicaram que o melhor empacotamento no caso de misturas granulares com alta quantidade de finos, onde há predominância de materiais com diâmetros inferiores a 250 μm , ocorria com um valor de q igual ou inferior a 0,25 [8].

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (2)$$

III. DOSAGEM ATRAVÉS DO MODELO CONTÍNUO DE A&A MODIFICADO

A proposição de um traço de concreto a partir do método de empacotamento de partículas se iniciou com a definição dos materiais que seriam utilizados e seus respectivos fornecedores. Buscou-se incorporar apenas matérias primas cujos provedores foram contatados e aceitaram disponibilizar material para a pesquisa – pensando em uma futura execução do traço obtido. Então iniciou-se o levantamento das curvas granulométricas desses insumos e suas respectivas densidades. Nos casos em que os fornecedores não disponibilizaram as informações necessárias, o material foi levantado a partir de artigos e teses que utilizaram os materiais e mencionaram os fornecedores.

Os dados de granulometria foram organizados no Excel. Na sequência o modelo contínuo de A&A modificado foi incorporado no software Maple para obtenção da curva mais próxima da curva ideal do modelo.

A. Obtenção das granulometrias

Foi utilizado o CP V ARI da Lafarge Holcim Brasil, a microssilica 920U da Elkem e a cinza de casca de arroz da Pilecco Nobre. Uma vez que esses fornecedores não disponibilizaram as curvas dos materiais foi preciso buscar artigos que continham esses gráficos. A Beneficiadora de Minérios Rio Claro (BMRC) forneceu as curvas granulométricas do pó de quartzo e da areia fina. O aditivo considerado foi o MC Power Flow 4001, um superplastificante sintético a base de polímeros policarboxilatos (PCE), também

disponível no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do CEATEC da PUC Campinas.

Após obter todas as imagens das curvas granulométricas foi preciso extrair os dados dos gráficos (% acumulada e diâmetro associado). Para isso foi utilizado o site “WebPlotDigitizer”, disponível em: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>. Após ajustar os pontos à curva (Fig. 3), basta exportar as variáveis X e Y para o Excel. A exportação consiste em selecionar “View Data”, manter o separador de colunas por ponto e vírgula para que cada variável seja inserida em uma coluna e clicar em “Download.csv”. Dessa forma, uma planilha do Excel será baixada automaticamente com as variáveis X e Y em duas colunas, necessariamente nessa ordem.

Ao repetir o processo, será obtida uma planilha para cada material com suas respectivas variáveis X (tamanho de partículas) e Y (quantidade passante/retida acumulada). Os dados extraídos das curvas geram diâmetros diferentes e para entrada na programação é preciso que exista apenas um diâmetro equivalente para todos os materiais. Por isso é preciso organizar os dados em único arquivo para iniciar a manipulação no Excel.

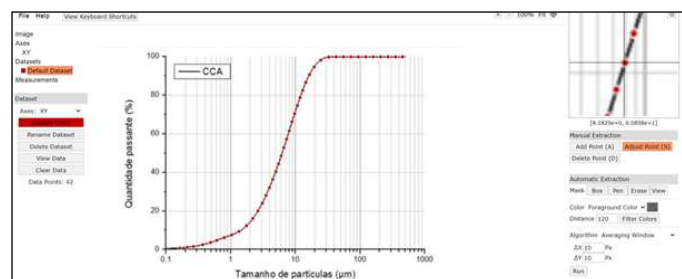


Fig. 3. Captura de tela do site WebPlotDigitizer para exemplificar o ajuste dos pontos na curva. Na figura, os pontos vermelhos já estão devidamente ajustados a curva granulométrica da cinza de casca de arroz Pilecco Nobre, obtida a partir da referência [26]. Fonte: autor.

B. Organização e interpolação dos dados no Excel

Uma vez que o modelo proposto por Funk e Dinger considera a porcentagem passante acumulada pela peneira [8], todas as porcentagens que foram utilizadas para propor a curva mais próxima da curva ideal do modelo A&A modificado devem ser passantes acumuladas. Por isso, quando a porcentagem apresentada no gráfico era retida acumulada foi preciso subtrair 100 para obter a passante correspondente.

Determinadas as porcentagens passantes acumuladas para todos os materiais que serão incorporados no estudo, foi preciso determinar uma série de diâmetros entre o mínimo de 0,08 μm da sílica ativa e o máximo de 595 μm da areia fina. Para encontrar as porcentagens passantes acumuladas referentes aos diâmetros estipulados foi preciso interpolar os dados. A interpolação se deu com auxílio das formulas SE, MÁXIMO, MÍNIMO e PROCX do Microsoft Excel. A tabela obtida a partir da interpolação é apresentada na Fig. 4 e será utilizada no Maple.

Uma vez interpolados os valores das porcentagens passantes acumuladas para os mesmos diâmetros, foi possível plotar todas as curvas granulométricas dos materiais em um único gráfico gerado a partir do Software OriginLab (Fig. 5).

Diâmetro (μm)	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada	Diâmetro (μm)	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada	% Passante acumulada
	Cimento	Sílica ativa	CCA	Pó de quartzo	Areia fina		Cimento	Sílica ativa	CCA	Pó de quartzo	Areia fina
0,08	0,00	7,30	0,00	0,00	0,00	5	32,58	100	40,62	6,02	0,00
0,20	0,00	45,67	0,81	0,00	0,00	10	51,84	100	71,44	25,20	0,00
0,25	0,00	57,46	1,18	0,00	0,00	15	64,70	100	87,68	48,94	0,00
0,30	0,00	62,49	1,59	0,00	0,00	20	82,35	100	95,04	75,46	0,00
0,35	0,00	67,78	2,14	0,19	0,00	25	93,59	100	98,03	91,76	0,00
0,40	0,00	72,22	2,62	0,20	0,00	30	98,94	100	99,05	97,95	0,00
0,45	0,00	75,83	3,03	0,21	0,00	35	100,00	100	99,57	100	0,00
0,50	0,65	79,64	3,45	0,22	0,00	50	100,00	100	99,62	100	0,00
0,55	0,79	82,82	3,91	0,24	0,00	75	100,00	100	99,63	100	2,65
0,60	1,01	85,52	4,38	0,25	0,00	100	100,00	100	100,00	100	18,94
0,65	1,29	87,65	4,82	0,26	0,00	125	100,00	100	100,00	100	36,93
0,70	1,64	89,69	5,18	0,28	0,00	150	100,00	100	100,00	100	55,21
0,75	1,97	91,01	5,54	0,29	0,00	175	100,00	100	100,00	100	70,46
0,80	2,28	92,24	5,90	0,30	0,00	200	100,00	100	100,00	100	85,70
0,85	2,73	93,21	6,23	0,31	0,00	225	100,00	100	100,00	100	93,32
0,90	3,19	94,17	6,52	0,33	0,00	250	100,00	100	100,00	100	95,85
0,95	3,71	94,60	6,81	0,34	0,00	275	100,00	100	100,00	100	98,37
1,00	4,22	95,00	7,10	0,37	0,00	300	100,00	100	100,00	100	100,00
1,05	4,83	95,33	7,39	0,40	0,00	325	100,00	100	100,00	100	100,00
1,10	5,45	95,58	7,68	0,43	0,00	350	100,00	100	100,00	100	100,00
1,15	6,09	95,84	7,95	0,47	0,00	375	100,00	100	100,00	100	100,00
1,20	6,85	96,35	8,29	0,50	0,00	400	100,00	100	100,00	100	100,00
1,25	7,46	97,32	8,59	0,53	0,00	425	100,00	100	100,00	100	100,00
1,30	7,84	97,93	8,89	0,56	0,00	450	100,00	100	100,00	100	100,00
1,35	8,21	98,41	9,19	0,59	0,00	475	100,00	100	100,00	100	100,00
1,40	8,67	98,88	9,49	0,62	0,00	500	100,00	100	100,00	100	100,00
1,45	9,16	99,42	9,84	0,66	0,00	535	100,00	100	100,00	100	100,00
1,50	9,47	100	10,21	0,69	0,00	565	100,00	100	100,00	100	100,00
						595	100,00	100	100,00	100	100,00

Fig. 4. Planilha obtida a partir da interpolação das porcentagens passantes acumuladas para diâmetros de 0,08 μm a 595 μm. Fonte: autor.

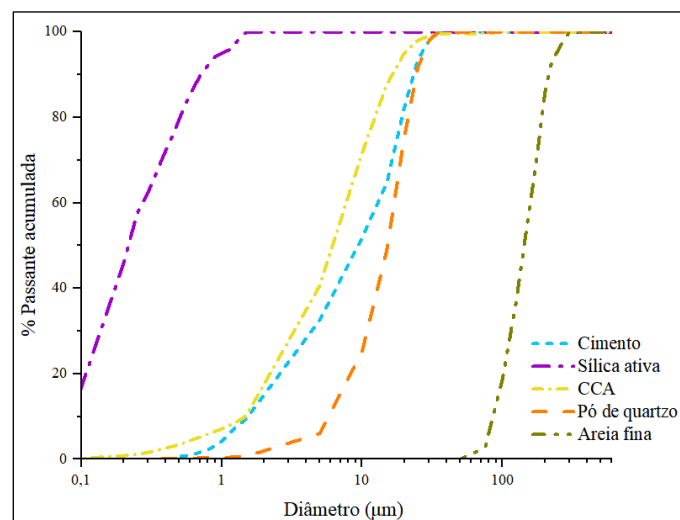


Fig. 5. Curvas granulométricas dos materiais que serão utilizados para obtenção da curva mais próxima da curva ideal do modelo A&A modificado. Fonte: autor.

C. Curva ideal da mistura pelo modelo A&A modificado

Equação 3 traz a fórmula matemática utilizada para plotar a curva de empacotamento ideal da mistura, em vermelho na Fig. 6, a partir do modelo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (2). Isso porque o modelo depende apenas do diâmetro máximo (595 μm da areia fina) e mínimo (0,08 μm da sílica ativa) dos componentes empregados e do coeficiente de distribuição q, cujo valor deve ser inferior a 0,25 em misturas granulares com alta quantidade de finos [8]. Nesse caso, após simulações com q variando de 0,20 a 0,25 foi adotado q=0,20.

$$P(D) = 100 \left(\frac{D^{0,20} - 0,08^{0,20}}{595^{0,20} - 0,08^{0,20}} \right) \quad (3)$$

D. Utilização do software Maple

O software Maple auxiliou na obtenção das curvas de empacotamento mais próximas da curva ideal da mistura. Para isso foi preciso declarar as densidades de cada material presente

no traço (cimento, sílica ativa, cinzas de casca de arroz, pó de quartzo, areia fina, superplastificante e água), aplicar restrições e definições. As densidades e curvas granulométricas do cimento da Lafarge Holcim Brasil (3.160 kg/m^3) e a microssilica 920U da Elkem (2.200 kg/m^3) foram obtidas a partir do artigo de referência [27], as informações da cinza de casca de arroz da Pilecco Nobre (2.160 kg/m^3) foram baseadas na tese de [26], enquanto os dados do pó de quartzo (2.770 kg/m^3) e areia fina (2.660 kg/m^3) foram disponibilizados pela Beneficiadora de Minérios Rio Claro. A densidade do aditivo superplastificante de alto desempenho MC-PowerFlow 4001 (1.120 kg/m^3) foi extraída da ficha técnica disponibilizada pelo próprio fabricante e a densidade da água foi adotada como 1.000 kg/m^3 .

Declaradas as densidades, foram aplicadas quatro restrições à programação: teor de cimento, superplastificante, ar e água/aglomerante. Após pesquisas prévias foram definidos alguns consumos de cimento: 700, 800 e 920 kg/m^3 , sendo o último deles idêntico ao adotado pela pesquisa de Vigneshwari [6], que serviu de base para esse estudo. O teor de aditivo foi fixado em 4% da massa de cimento. O volume de ar incorporado no concreto foi considerado de 4%. A relação água aglomerante foi definida em 0,19. Na sequência, foram declaradas três definições: volume total dos materiais secos, frações volumétricas dos materiais secos e volume total do concreto.

Finalmente a planilha com as porcentagens passantes acumuladas (Fig. 4) e a curva ideal da mistura pelo modelo de A&A modificado (3) foram importadas no Maple. Através de linguagem de programação o Software encontra frações volumétricas ideais para cada material. A somatória das frações volumétricas encontradas para cada componente multiplicadas pelo diâmetro correspondente nos retorna a curva de empacotamento mais próxima da curva ideal da mistura.

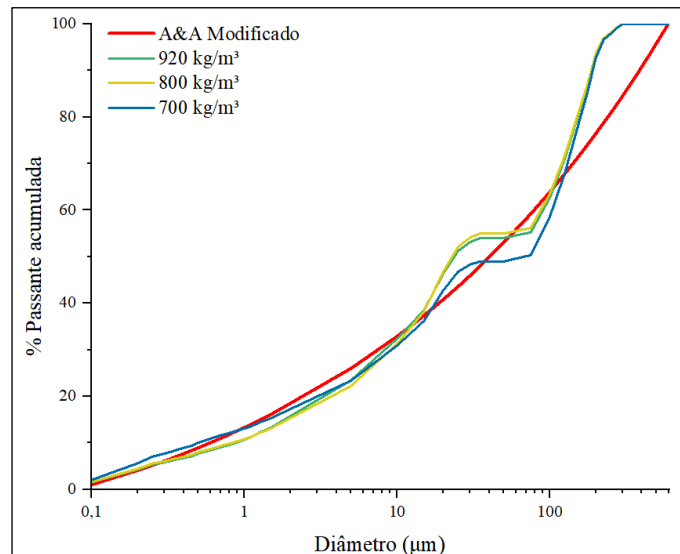


Fig. 6. Curvas de empacotamento obtidas a partir das frações volumétricas estipuladas pelo Maple para diferentes consumos de cimento e curva ideal da mistura pelo modelo A&A modificado. Fonte: autor.

Para os consumos de 800 e 920 kg/m^3 foi preciso declarar restrições para incluir o pó de quartzo e a CCA, pois o programa apontava que proporção desses materiais deveria ser 0. Isso porque são componentes que possuem granulometria muito próxima a partir de 50% passante, como pode-se ver na Fig. 5.

E. Índice de Desvio de Empacotamento (IDE)

De acordo com [3], a diferença entre a curva ideal obtida através da equação de A&A modificado e a curva da mistura deve ser determinada como Índice de Desvio de Empacotamento (IDE). Quanto menor for esta área, menor será o IDE, e, consequentemente, melhor será o empacotamento da mistura. Por isso, a mistura tende a apresentar maior resistência à compressão quanto mais baixo for este índice.

No entanto, a curva de empacotamento que resultou no menor IDE foi correspondente ao consumo de 700 kg/m^3 , valor muito inferior ao utilizado pela literatura para obtenção de UHPC. O segundo menor IDE corresponde ao consumo de 920 kg/m^3 , por isso ele é apresentado na Fig. 7. Ainda assim, o IDE obtido nessa pesquisa foi muito superior ao apresentado por [3]. Enquanto a referência obteve valores da ordem de 100, o valor encontrado no presente estudo foi da ordem de 4.000.

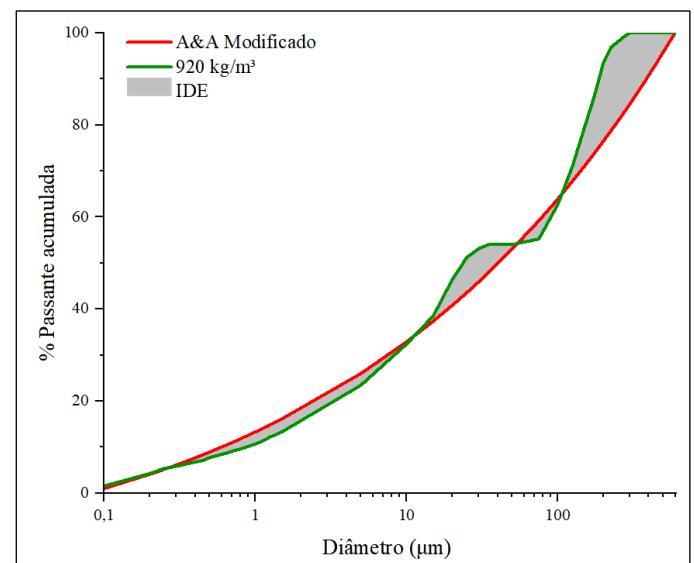


Fig. 7. Índice de Desvio de Empacotamento apresentado pela curva de consumo de cimento 920 kg/m^3 . Fonte: autor.

IV. CONCLUSÃO

Após simulação da dosagem por empacotamento, constatou-se que a mistura com consumo de 920 kg/m^3 gerou uma possibilidade de traço para pesquisa subsequente. Concluiu-se que materiais com granulometrias distintas são imprescindíveis para um bom empacotamento. Como as cinzas de casca de arroz e o pó de quartzo tinham granulometrias muito próximas do cimento, o que pode ser facilmente observado pela proximidade entre as curvas amarela, azul e laranja na figura 5, foi preciso forçar a inclusão desses materiais na mistura. O alto índice de desvio de empacotamento encontrado indica que a curva da mistura não ficou tão próxima da curva ideal. A maior distância entre a curva ideal e a curva da mistura se encontra na última porção do gráfico, onde os valores no eixo x variam de 100 a 600, por isso a área nesse trecho é muito elevada. Uma vez a proximidade entre as granulometrias do cimento, CCA e pó de quartzo, influenciou negativamente o procedimento de dosagem, recomenda-se que trabalhos futuros busquem pó de quartzo com granulometria mais grossa e CCA com granulometria mais fina e refaçam o processo de dosagem por empacotamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a Caroline Marção Wolf de Goes pelo suporte fornecido.

REFERÊNCIAS

- [1] C. O. E. Oliveira, G. de F. Maciel, A. L. De Castro, M. P. Barbosa, e R. S. Campos, “Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho”, *Rev. Mater.*, vol. 23, nº 1, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620170001.0298.
- [2] R. S. Campos, “Concreto Autoadensável Produzido Com Resíduos De Construção E Demolição”, *Dissertação (Mestrado em Sist. Infraestrutura Urbana)*. Pontifícia Univ. Católica Campinas., 2017.
- [3] Roberto Christ, “Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)”, *Dissertação (Doutorado em Eng. Civil)*. Univ. do Val. do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo., 2019.
- [4] AFNOR - Association Française de Normalisation., “NF P18 470, 2016 Edition. Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity.”, p. 2016, 2016.
- [5] L. ZHENGQI, “Proportioning and properties of ultra high performance concrete (UHPC) mixtures for application in shear keys of precast concrete bridges.”, *Tese doutorado. Esc. Pós-Graduação da Univ. Clemson, Estados Unidos.*, p. 2015, 2015.
- [6] M. Vigneshwari, K. Arunachalam, e A. Angayarkanni, “Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete”, *J. Clean. Prod.*, vol. 188, p. 264–277, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.008.
- [7] AFNOR - Association Française de Normalisation., “NF P18-710, 2016 Edition. National addition to Eurocode 2 - Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC).”, p. 2016, 2016.
- [8] M. G. Sohail *et al.*, “Advancements in concrete mix designs: High-performance and ultrahigh-performance concretes from 1970 to 2016”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, nº 3, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002144.
- [9] A. Tafroui, G. Escadeillas, e T. Vidal, “Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, p. 980–987, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169.
- [10] J. Xue, B. Briseghella, F. Huang, C. Nuti, H. Tabatabai, e B. Chen, “Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119844, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.
- [11] M. Alkaysi e S. El-Tawil, “Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance”, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, nº 10, p. 4185–4200, 2016.
- [12] J. Abellán-García, “Four-layer perceptron approach for strength prediction of UHPC”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119465.
- [13] M. Q. Moraes e R. R. Lopes, “Análise Da Contribuição De Adições De Microssilica E Nanossilica Na Resistência À Compressão De Concretos Convencionais”, 2010.
- [14] Tecnosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., “Silica Ativa.”, Disponível em <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em 05 jun. 2021., p. 2021, 2021.
- [15] A. Mehta e D. K. Ashish, “Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review”, *J. Build. Eng.*, vol. 29, nº July 2019, p. 100888, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.100888.
- [16] J. P. F. Guimarães, “A Silica Ativa e sua contribuição para a sustentabilidade”, p. 4–5, 2020.
- [17] A. Tafroui, G. Escadeillas, S. Lebaili, e T. Vidal, “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 2, p. 669–674, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018.
- [18] M. Pezeshkian, A. Delnavaz, e M. Delnavaz, “Development of UHPC mixtures using natural zeolite and glass sand as replacements of silica fume and quartz sand”, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 2019, doi: 10.1080/19648189.2019.1610074.
- [19] ABIARROZ – Associação Brasileira da Indústria do Arroz., “Perfil da produção.”, Disponível em <http://brazilianrice.com.br/br/sobre-o-brasil/>. Acesso em 02 maio 2020., p. 2020, 2020.
- [20] M. A. Mosaberpanah e S. A. Umar, “Using rice husk ash as supplement to cementitious materials on performance of ultrahigh-performance concrete: a review”, *Mater. Today Sustain.*, nº December, p. 100030, 2019, doi: 10.1016/j.mtsust.2019.100030.
- [21] V. T. A. Van, C. Röbber, D. D. Bui, e H. M. Ludwig, “Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, p. 270–278, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015.
- [22] H. M. T. LOPES, “Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland”, *Diss. (Mestrado em Eng. Civ. Estruturas) – Esc. Eng. São Carlos, Univ. São Paulo, São Carlos.*, p. 174, 2019.
- [23] A. L. de Castro, J. B. L. Liborio, e V. C. Pandolfelli, “Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional”, *Cerâmica*, vol. 55, nº 335, p. 233–251, 2009, doi: 10.1590/s0366-69132009000300002.
- [24] C. M. W. de Goes, P. A. Krah, L. C. de Almeida, e L. M. Trautwein, “Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho”, *An. do 62º Congr. Bras. do Concreto*, nº November, p. 16, 2020.
- [25] T. Sedran, “Mixture-Proportioning of High- Performance Concrete”, vol. 8846, nº November, 2020, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00861-X.
- [26] R. P. Real, “Avaliação da utilização da cinza de casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho.”, *Diss. - Cent. Fed. Educ. Tecnológica Minas Gerais. Programa Pós Grad. em Eng. Civil. Belo Horizonte.*, p. 76, 2018.
- [27] A. L. De Castro, J. B. L. Liborio, e V. C. Pandolfelli, “A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional (The influence of cement type on the performance of advanced concretes designed by computing mix proportion technique)”, *Cerâmica*, vol. 57, p. 10–21, 2011.