Concreto Refratário Auto-Escoante: Metodologia de Formulação e Correlações entre Distribuição Granulométrica e Reologia

Rafael Giuliano Pileggi, Victor Carlos Pandolfelli e José de Anchieta Rodrigues

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa, Rodovia Washington Luis Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP

Resumo: O comportamento reológico de um concreto é bastante dependente de sua distribuição granulométrica, além de outros fatores. Este estudo buscou avaliar tal relação de dependência afim de gerar subsídio teórico que permita, a partir da distribuição granulométrica, prever qualitativamente a fluidez de concretos. Os resultados mostraram concordância entre os comportamentos reológicos previstos para diversas distribuições granulométricas com os obtidos experimentalmente, sendo possível gerar um modelo de procedimento de formulação de concretos capaz de estimar qualitativamente tal comportamento reológico dos mesmos, considerando constantes as outras variáveis que o afetem. Como conseqüência, obteve-se um concreto refratário auto-escoante com ultra-baixo teor de cimento.

Palavras-chave: *concreto, granulométria, fluidez*

Introdução

O estudo da distribuição granulométrica é condição básica para o desenvolvimento de materiais cerâmicos em geral, inclusive concretos, visto ser determinante de uma série de propriedades dos mesmos. Entre estas, destaca-se o controle do comportamento reológico de suspensões e concretos, da resistência mecânica final de corpos cerâmicos, da densidade de empacotamento de pós e misturas, da porosidade, etc.

Historicamente diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos com intuito de descrever o empacotamento de partículas. Surgiram tanto abordagens discretas, que tratam as partículas individualmente, quanto abordagens contínuas, que consideram todos os diâmetros para as mesmas. Modelos como os de Furnas[1] (discreto) e Andreasen[1] (contínuo) tornaram-se bastante conhecidos. No entanto, Dinger e Funk[1] desenvolveram um novo modelo que provou serem similares os modelos citados. Este novo modelo conhecido como "Alfred", é abaixo apresentado:

$$CPFT = \frac{(D^{q} - D_{S}^{q})}{(D^{q} - D_{S}^{q})} \cdot 100 \qquad (1)$$

onde:

CPFT = porcentagem acumulada menor que o diâmetro D; D = diâmetro da partícula; D_L = diâmetro da maior partícula; D_S = diâmetro da menor partícula; q = módulo ou coeficiente da distribuição.

Reproduzindo-se experimentalmente diversas distribuições, observou-se que a de "Alfred" leva à obtenção de densidades de empacotamento superiores para um mesmo coeficiente q[2]. Este coeficiente é fator determinante da densidade de empacotamento, sendo as maiores obtidas para q = 0,37 segundo Dinger e Funk[3]. Diferentes valores de q induzem a distintos[4] comportamentos reológicos. Em concretos, para uma mesma extensão granulométrica, à medida que q desvia-se de 0,37, aproximando-se de 0,2, a fluidez tende a aumentar. Valores superiores a 0,37 favorecem o comportamento dilatante. Coeficientes muito pequenos (q = 0,2) causam um excessivo aumento na área superficial das partículas, reduzindo novamente a fluidez. Mantendo-se o coeficiente da distribuição e aumentando-se a extensão granulométrica, aumenta-se a fluidez do sistema até que, pela adição excessiva de partículas pequenas, essa propriedade é afetada pelo aumento na área superficial. Não obstante os modelos, não podem ser desconsiderados outros fatores que, além do empacotamento das partículas, afetam o comportamento reológico dos concretos, tais

como morfologia e porosidade das partículas, concentração de sólidos, aditivos, temperatura de processo, umidade ambiente e condição de mistura.

Considerando o fato de que matérias-primas reais são formadas por distribuições granulométricas de partículas em geral não esféricas, surge a questão de como combiná-las afim de obter uma distribuição planejada, que atenda a determinado comportamento reológico desejado.

O primeiro passo consiste em fixar as análises das distribuições granulométricas das matérias-primas em um único princípio de ensaio, isto é, ou em peso, ou em volume, ou em número. No caso de concretos é conveniente utilizar caracterização em peso, empregando peneiramento para as partículas maiores (agregados), superiores à malha 325 mesh (44 mm), e técnicas de sedimentação para as partículas menores. O ensaio de peneiramento leva a resultados discretizados das distribuições granulométricas contínuas dos materiais. Os resultados de sedimentação, embora contínuos, devem ser discretizados proporcionalmente à série de peneiras empregadas, gerando desta forma uma série de dados utilizáveis no processo de formulação.

Desta forma, para comprovar a metodologia apresentada, supostamente capaz de ser utilizável no desenvolvimento de concretos em geral, foi elaborada uma seqüência de experimentos a resultar em um concreto refratário auto-escoante de ultra-baixo teor de cimento (1,5%).

Procedimento Experimental

Para formular uma composição, utilizando matérias-primas caracterizadas da maneira descrita, é necessário que se construa uma tabela que as contenha, onde todos os diâmetros e suas respectivas porcentagens discretizadas estejam presentes. Desta forma, estimando-se valores para a porcentagem presente de cada matéria-prima na formulação, calcula-se a distribuição granulométrica acumulada final da mesma. Tendo em vista uma distribuição alvo qualquer, estabelecida por razões próprias, por exemplo uma distribuição "Alfred" com máxima densidade de empacotamento (q = 0,37), efetua-se uma comparação visual das representações gráficas das duas distribuições e, desta forma, verifica-se o quão próximo a distribuição resultante da formulação proposta está da idealizada. Caso o resultado esteja distante do desejado, refaz-se o processo de estimativa das porcentagens das matérias-primas presentes na formulação. Esse processo iterativo é efetuado até o resultado ser considerado satisfatório. Não sendo possível atingir nenhuma formulação próxima à distribuição desejada, é conveniente introduzir, eliminar ou ainda substituir alguma matéria-prima empregada, afim de se aproximar da distribuição granulométrica desejada. A Fig. 1 exemplifica algumas das composições granulométricas estudadas, utilizando-se o modelo de "Alfred" para q = 0,37 e q = 0,31.

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o peneiramento em uma série mesh completa de peneiras entre as

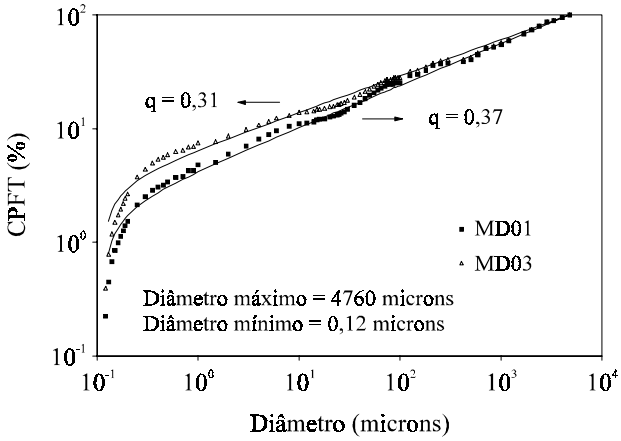

Figura 1. Ilustração do fino ajuste obtido entre as curvas alvo (Alfred) e distribuições experimentais (MD).

malhas 4 a 325 para as frações mais grossas. As partículas mais finas foram analisadas em um sedígrafo modelo 5000 D da Micromeritics. A seguir, adotando a metodologia apresentada, foram elaboradas 8 composições básicas correspondentes a 4 curvas alvo distintas (Tabela 1).

Todas as composições foram processadas e ensaiadas de maneira única, descrita a seguir:

- Pesagem individual das matérias-primas;
- Pesagem individual dos aditivos (sólidos);
- Medição da água filtrada (20 °C) em volume;
- Mistura em batedor planetário (4 a 6 min);
- Moldagem de 3 corpos de prova (160x40x40 mm^3);
- Ensaio de fluidez em função do tempo (mesa de fluidez - diâmetro inferior de cone = 120 mm);
- Cura dos corpos de prova em ambiente úmido(24 h);
- Secagem dos corpos de prova a 110 °C (24 h);
- Secagem dos corpos de prova a 110 °C (24 h);
- Medida de porosidade aparente (P.A.), densidade aparente (D.A.) e absorção de água (A.A.) (NBR 6220); e resistência à flexão em 3 pontos (ASTM t - 399, máquina universal de ensaios MTS - 810).

As composições com sigla MD correspondem a curvas alvo que seguem o modelo de "Alfred" com um único q, objetivando obter concretos com baixa fluidez e elevada densidade, enquanto as composições com sigla SF, possuem curvas alvo do tipo "Alfred", mas com dois valores de coeficientes q em sua extensão, idealizando-se um comportamento auto-escoante.

Resultados e Discussões

Sabidamente, o estado de defloculação de um concreto é condição determinante de sua fluidez e da correta avaliação do empacotamento. Sendo assim, para uma composição de máxima densidade de empacotamento, MD01 (Fig. 1), mantida constante a concentração de sólidos, diversos aditivos, em quantidades variáveis, foram testados. Os resultados obtidos permitiram determinar uma combi-

Tabela 1. Composições básicas elaboradas.

	Formulações em Porcentagem em Peso									
Código	MS	A1000	A3000	CA25	TPFII	TP50	20/40	8/20	4/10	D.T.
MD01	2,53	0,10	5,31	1,52	16,54	11,23	11,64	25,62	25,52	3,91
MD02	2,82	0,10	3,68	1,52	16,78	10,23	13,30	26,09	25,47	3,90
MD03	4,50	0,10	5,20	1,50	16,20	11,00	11,40	25,10	25,00	3,85
MD04	5,00	0,10	3,60	1,50	16,40	10,00	13,00	25,50	24,90	3,83
SF01	5,17	8,34	21,89	1,55	3,13	16,68	14,59	15,11	13,55	3,83
SF02	5,17	7,82	21,89	1,55	3,65	16,68	14,59	15,11	13,55	3,83
SF03	9,00	8,00	21,00	1,50	3,00	16,00	14,00	14,50	13,00	3,72
SF04	9,00	7,50	21,00	1,50	3,50	16,00	14,00	14,50	13,00	3,72

nação de aditivos a ser empregada nas demais composições (Figs. 2 e 3).

A etapa seguinte foi a de verificação da metodologia de formulação. Comparando os resultados de fluidez das composições MD01 a 04, pôde-se notar a concordância entre os valores de fluidez previstos qualitativamente. As formulações MD03 (Fig. 1) e 04 por possuírem q (q = 0,31) menor que as composições MD01 e 02 (q = 0,37), deveriam ser mais fluidas, fato este que se verificou na prática (Fig. 3, Tabela 2).

Portanto, sendo considerada confiável a metodologia de formulação, deu-se prosseguimento ao desenvolvimento das formulações auto-escoantes. Um concreto auto-escoante nada mais é que um de elevada fluidez (80 a 110% na mesa de fluidez). Considerando características físicas, sua grande vantagem diz respeito à facilidade de aplicação, dispensando inclusive a necessidade de vibração.

No intuito de obter concretos auto-escoantes com ultra-baixo teor de cimento (1,5%), Myhre[4] sugere um tipo de distribuição granulométrica denominado "gap-sized", o qual consiste em se dividir a extensão granulométrica em duas regiões distintas separadas por um intervalo. Mais detalhadamente, a distribuição acumulada deve apresentar um patamar entre os extremos da distribuição, cada qual seguindo a própria distribuição de "Alfred" com os respectivos coeficientes de distribuição (q). O conceito empregado consiste em reunir as características vantajosas de duas distribuições distintas em uma única. No caso, deseja-se obter um concreto com elevada fluidez mas com características físicas no mínimo similares às de concretos de alta

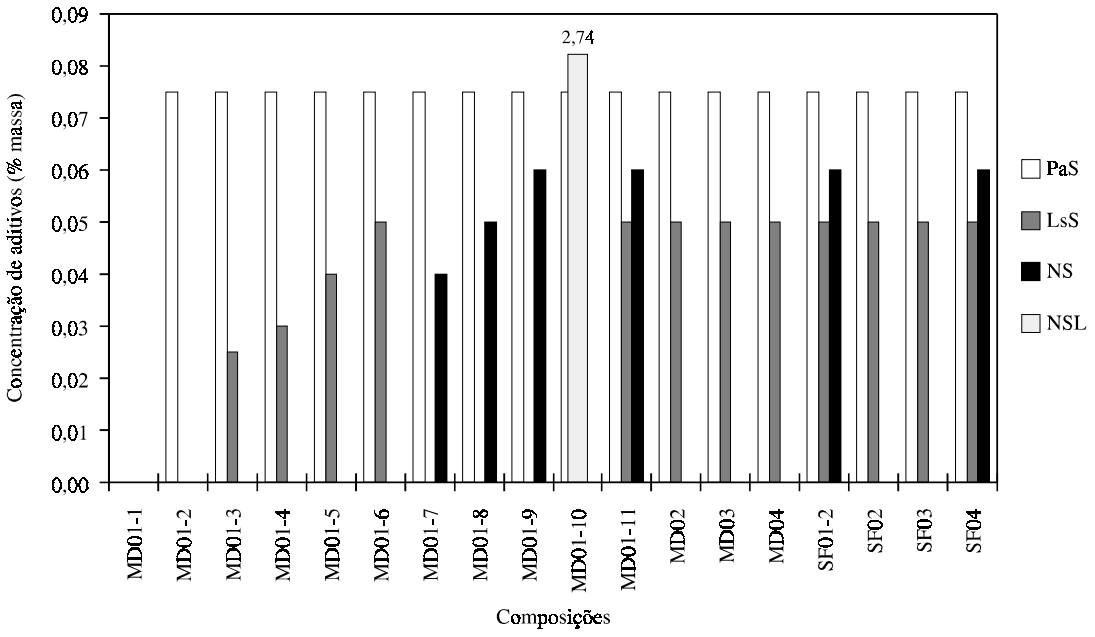

Figura 2. Composições formuladas para avaliação do efeito do aditivo - PaS (poliacrilato de sódio); LsS (lignossulfonato de sódio); NS (naftaleno sulfonado (sólido)); NSL (naftaleno sulfonado em solução, concentração em volume (2,74 mL)); MD (distribuições com um único q); SF (distribuições "gap-sized").

Tabela 2. Teor de água empregado na moldagem e resultados dos ensaios físicos das composições após secagem a 110 °C.

		Resultados					
Composição	Água (%)	Flow15 (%)	P.A. (%)	D.A. (g/cm^3)	D. Rel.	A.A. (%)	σ (MPA)
MD01-1	6,50	4,00	11,47	3,45	0,88	3,76	0,88
MD01-2	3,84	9,60	8,44	3,63	0,93	2,54	4,56
MD01-3	3,84	9,60	9,12	3,64	0,93	2,76	3,85
MD01-4	3,84	10,40	9,28	3,61	0,92	2,83	3,73
MD01-5	3,84	10,00	9,64	3,64	0,93	2,93	4,12
MD01-6	3,84	12,40	9,77	3,61	0,92	3,00	2,79
MD01-7	3,84	10,00	8,99	3,59	0,92	2,75	,4,47
MD01-8	3,84	10,40	8,83	3,58	0,92	2,70	4,17
MD01-9	3,84	12,00	8,91	3,59	0,92	2,72	4,49
MD01-10	3,84	8,00	8,71	3,59	0,92	2,66	4,34
MD01-11	3,84	12,80	9,52	3,59	0,92	2,93	2,95
MD02	3,85	8,80	9,68	3,60	0,92	2,97	2,66
MD03	3,90	36,00	9,57	3,65	0,95	2,90	3,67
MD04	3,91	34,40	9,60	3,64	0,95	2,92	3,73
SF01-2	4,92	106,40	12,24	3,51	0,92	3,97	4,96
SF02	4,92	76,00	11,72	3,51	0,92	3,79	5,50
SF03	5,00	92,00	11,66	3,44	0,92	3,84	6,21
SF04	5,00	69,20	11,56	3,39	0,91	3,85	6,28

densidade de empacotamento, como por exemplo, baixa retração de secagem. Para isto, a curva alvo idealizada é do tipo "gap-sized", com coeficientes de distribuição distintos para os extremos da mesma. Na porção das partículas de maior diâmetro, este deverá ser baixo (q = 0,21) afim de favorecer a fluidez por propiciar um maior teor de "finos" na mesma. Na porção das partículas pequenas, o coeficiente deve ser tal a maximizar o empacotamento e a fluidez[4] (q = 0,37 maximiza a fluidez em sistemas de partículas finas), minimizando porosidade e tendência à retração.

As composições SF01 e 02 (Tabela 1) foram elaboradas de acordo com tal conceito. Pelos resultados de fluidez obtidos (Fig. 3, Tabela 2) é coerente inferir que, de fato a distribuição "gap-sized", da forma como foi planejada, leva a um concreto auto-escoante, visto terem sido obtidos elevados valores de fluidez. A diferença entre os resultados destas composições pode ser atribuída aos distintos ajustes em relação à curva alvo idealizada. Novamente, ratifica-se a validade do procedimento de formulação pela concordância entre os resultados obtidos com os esperados. As composições SF03 e 04 foram elaboradas em relação a uma curva alvo com coeficiente q = 0,33 na parte de partículas "finas". Os resultados mostraram uma queda na fluidez em relação à composição SF01-2 (Fig. 3, Tabela 2), provavelmente devido ao desvio de q em relação à 0,37, além de que o maior teor de partículas "finas" pode ter ocasionado um excessivo aumento na área superficial. Não foi observada retração de secagem nos corpos, tanto para as distribuições MD (MD01 a 04), como para as SF (SF01 a 04). Isto é indicativo de que as distribuições "gap-sized" elaboradas minimizam a tendência à retração. As formulações SF apresentaram valores ligeiramente inferiores de densidade aparente em relação às MD (Fig. 3, Tabela 2), coerente com os valores calculados para as densidades teóricas máximas (D.T.) das composições (Tabela 1), uma vez que as MD, por serem contínuas e por seus respectivos valores de q, deveriam possuir densidades superiores, caso não apresentassem falhas de moldagem, como ocorre em MD01-1 (devido à baixa fluidez). Outro fator a colaborar a este decréscimo de densidade é o teor de água de moldagem ligeiramente superior nas SF em relação às MD (Tabela 2), devido à maior área superficial relativa à distinta distribuição granulométrica das composições. É importante notar que um aumento no teor de água nestas proporções por si só não justifica o comportamento auto-escoante destas composições, visto MD01-1. Uma vez que não houve variação significativa entre as densidades relativas (D.Rel. = D.A./Dt, onde Dt é a densidade teórica calculada

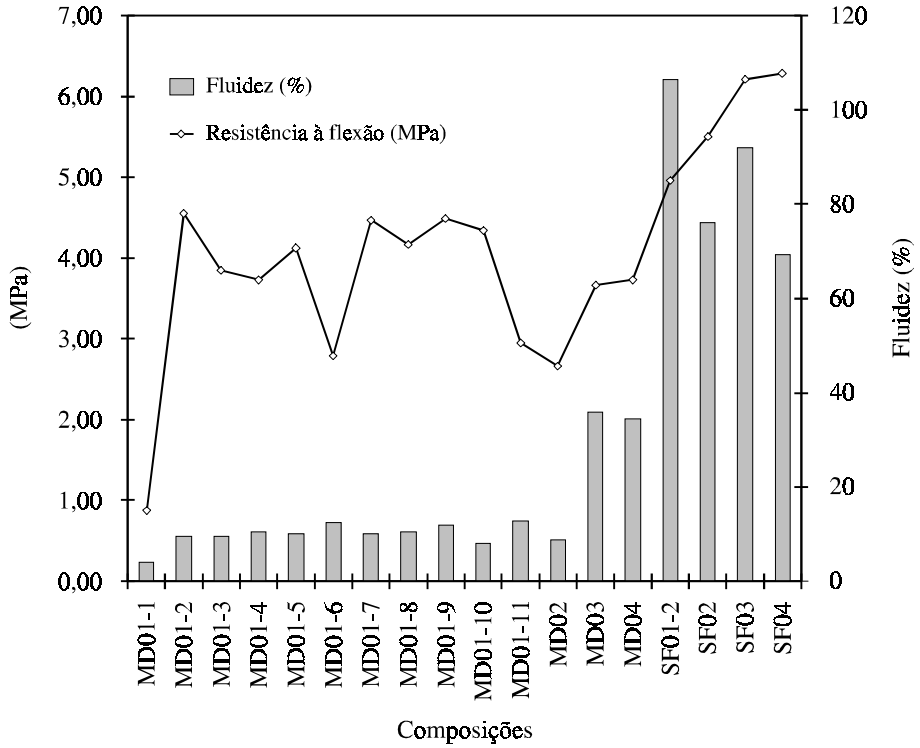

Figura 3. Resultados da resistência à flexão (3 pontos) e fluidez das composições estudadas.

para a composição considerando porosidade nula; Tabela 2) das composições, pode-se inferir que as distribuições "gap-sized" não interferem na obtenção real do empacotamento das partículas. O fato de as MD apresentarem resultados de resistência à flexão inferiores às SF (Fig. 3, Tabela 2) pode estar relacionado com um maior tamanho do defeito crítico presente nos corpos-de-prova, decorrente da maior dificuldade de moldagem das mesmas. Desta feita, é possível observar que as composições SF apresentaram características físicas similares às MD, além de valores superiores de resistência à flexão.

Tais resultados, apesar de aparentemente simples, não são óbvios, pois de longa data é usualmente aceito que concretos elaborados com distribuições descontínuas devem possuir baixa fluidez, quando comparados aos de distribuições contínuas[4], os quais ainda deveriam apresentar desempenhos superiores perante quase todas as propriedades físicas (resistência a flexão, densidade, etc.)[4].

Resta inferir que entre as combinações de aditivos testadas (Fig. 2) não foram notadas diferenças entre os resultado's de fluidez obtidos para MD01-6 e MD01-11. Assim, os diferentes resultados reológicos obtidos para as composições SF foram atribuídos às distribuições granulométricas distintas.

Conclusões

Tendo em vista a proposta inicial do trabalho, que foi de desenvolver uma metodologia de formulação capaz de estimar nominalmente a fluidez de concretos a partir da distribuição granulométrica, podem ser feitas as seguintes considerações:

- É de fato correto utilizar a distribuição de "Alfred", da forma descrita, para antever a fluidez de concretos, mas o conceito mais corrente na literatura, de que distribuições descontínuas não levam a resultados satisfatórios em concretos, não pode ser considerado como verdade absoluta, visto que já são utilizadas da forma empregada neste trabalho e os resultados têm-se revelados positivos;
- A metodologia apresentada como procedimento de formulação mostrou-se coerente, por ter levado a resultados de fluidez concordantes entre os previstos e os obtidos na prática, sendo de fácil aplicação, permitindo combinar um número qualquer de matérias-primas e, quanto mais completa for a caracterização das mesmas, maior será a precisão do ajuste. No entanto, tem muito ainda a ser desenvolvido, principalmente quanto à forma de caracterização das matérias-primas;
- A partir do conceito de distribuição "gap-sized", eficientes concretos refratários auto-escoantes com ultra-baixo teor de cimento podem ser desenvolvidos;
- A influência da distribuição granulométrica sobre a fluidez não pode ser considerada como sendo a única, outros fatores que interferem no comportamento reológico de concretos (morfologia e porosidade das partículas, aditivos, concentração de

sólidos, temperatura de processo, umidade ambiente e condição de mistura) devem ser considerados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Cerâmica Saffran, Capes e CNPq.

Referências Bibliográficas

1. Dinger, D.R. e Funk, J.E. - *Particle Packing, Part III - Discrete versus Continuous Particles Sizes.* interceram, vol. 41, nº 5, 332-334, 1992.
2. Sobarzo, P.M.P., Resende, W.S. e Kazimoto, T. - *Efeitos das Distribuições Granulométricas de Máxima Densidade nas Características de Concretos Refratários.* Cerâmica, 31 (185), 89-98, junho 1985.
3. Dinger, D.R. e Funk, J.E. - *Particle Packing, Part IV - Computer Modelling of Particle Packing Phenomena.* Interceram, vol. 42, nº 3, 150-152, 1993.
4. Myhre, B. - *The Effect of Particle Size Distribution on Flow of Refractory Castables.* American Ceramic Society, 30º Simpósio Anual de Refratários, St. Louis, Missouri, 25 de março de 1994.