

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Caueh Salzedas Teixeira <sup>1</sup>; Heloísa Cristina Fernandes Cordon <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este trabalho visa analisar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão do concreto. A busca por concretos com alta resistência à compressão e baixa permeabilidade é tema de estudo há muitos anos. Como resultado, pretende-se verificar como a distribuição granulométrica dos materiais constituintes do concreto rege o empacotamento destas partículas e consequentemente sua resistência à compressão no estado endurecido. Os resultados obtidos neste trabalho indicam um maior rendimento nos concretos que foram formulados com maior densidade de empacotamento.*

## Introdução

Em misturas granulares, como é o caso do concreto, a densidade de empacotamento possui grande influência nas suas características físicas. Para este componente estrutural é desejável que a mistura possua alta densidade de empacotamento, uma vez que dessa forma o material apresentará uma resistência mecânica elevada, ou seja, alta resistência à compressão e à tração tendo em vista os concretos comuns. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), o conceito de uma alta densidade de empacotamento foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho. Sendo assim, é fundamental que haja um estudo detalhado da distribuição granulométrica para a dosagem correta e a otimização dos constituintes do concreto. Neste trabalho buscou-se dosar misturas com o máximo empacotamento de partículas visando à produção de um concreto de alto desempenho (CAD) que tivesse sua resistência mecânica otimizada. Entende-se que um concreto apresenta alto desempenho segundo padrões normativos brasileiros, quando possui no mínimo 50 MPa de resistência à compressão e demais propriedades exigidas pela obra, de acordo com a finalidade à qual a obra se destina (ABNT, 2007). É consenso entre os pesquisadores de CAD que a baixa relação água/cimento é um fator decisivo na produção deste tipo de concreto. Portanto conciliando uma alta densidade de empacotamento, e um baixo fator água/cimento, o concreto dosado possuirá acentuadas melhorias nas suas propriedades, tais como resistência à compressão, e alta durabilidade, devido à redução da porosidade do material, e atendendo os padrões normativos brasileiros, poderá ser considerado um concreto de alto desempenho.

O objetivo deste trabalho é verificar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão de concretos formulados com diferentes densidades de empacotamento.

### Empacotamento de partículas

Define-se o fenômeno do empacotamento de partículas como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (McGEARY, 1961 *apud* BARBOSA, 2008). Sendo assim, um material com densidade de empacotamento teórica máxima possuiria ausência de vazios. Teoricamente esta condição poderia ser alcançada, porém devido à irregularidade na morfologia (o formato das partículas não é perfeitamente esférico) e na distribuição granulométrica, torna-se muito difícil reproduzir o máximo empacotamento teórico para misturas granulares como o concreto. Mesmo assim, é possível

aumentar a densidade de empacotamento do concreto para melhorar sua qualidade.

Em 1892, Féret publicou o primeiro estudo sobre o empacotamento de partículas em concreto. Nele, a equação apresentada mostrou que quanto maior a densidade de empacotamento, e consequentemente menor a porosidade do concreto, maior seria sua resistência (AIQIN *et al.*, 1997; AIQIN *et al.*, 1999; DE LARRARD & SEDRAN, 1994). Desde então foram apresentados modelos de distribuições granulométricas que proporcionariam o máximo empacotamento de partículas e poderiam otimizar misturas granulares de concreto. Myhre & Hundere (1996) indicam os modelos de Furnas (1931) e Andreassen & Andersen (1930) como clássicos. O Modelo de Furnas (Equação 1) possui abordagem discreta, ou seja, considera as partículas individualmente, e o Modelo de Andreassen (Equação 2) aborda as partículas como uma distribuição contínua.

$$CPFT(\%) = 100x \left( \frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$CPFT(\%) = 100x \left( \frac{D_P}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 2}$$

O Modelo de Andreassen considera partículas infinitamente pequenas, o que não representa de fato a realidade. Buscando corrigir este fato, foi desenvolvido o Modelo de Alfred (Equação 3), um aperfeiçoamento dos modelos anteriores, onde o diâmetro da menor partícula da mistura é considerado. Sendo assim, quando o tamanho da menor partícula da mistura tende a zero, o Modelo de Alfred aproxima-se do de Andreassen.

$$CPFT(\%) = 100x \left( \frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Nas equações acima o termo  $CPFT$  diz respeito à porcentagem volumétrica das partículas menores que o diâmetro  $D_p$ .  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula,  $D_s$  é o diâmetro da menor partícula,  $r$  é a razão entre a diferença de volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas e  $q$  é o coeficiente de distribuição. A ideia dos modelos é prever a distribuição granulométrica ideal que proporcionaria o máximo empacotamento das partículas (mínimo de vazios) dentro de um material composto por grãos de diversos tamanhos.

Em ambos os modelos, é necessário adotar um valor do coeficiente de distribuição ( $q$ ) desejado. Segundo Funk e Dinger (1993) *apud* Oliveira *et al.* (2000) o valor  $q=0,37$  apresenta a distribuição granulométrica que alcançaria o máximo empacotamento das partículas.

## Material e Métodos

A investigação da influência do empacotamento de partículas nas propriedades físicas do concreto foi realizada de acordo com a metodologia experimental apresentada a seguir.

### Materiais e Equipamentos

Foram utilizados na produção dos concretos cimento CPV-ARI, Elkem Microsilica® 920U, quartos de 10 granulometrias diferentes (6,3 mm; 4,8mm; 2,4mm; 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm; 0,075mm; 0,04mm e 0,02mm), aditivo superplasticificante (ADVA CAST 585) e água.

Todos os materiais pulverulentos e granulares utilizados (cimento, microssílica e quartzo) foram caracterizados quanto à sua massa específica e distribuição granulométrica. A distribuição granulométrica dos materiais mais grossos foi realizada através de peneiramento por peneiras padronizadas pela ABNT. Seis faixas granulométricas do quartzo foram caracterizadas desta maneira (6,3mm; 4,8mm; 2,4mm; 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm). A

distribuição granulométrica dos materiais finos foi determinada a partir de ensaios de granulometria a laser realizados no Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma prensa mecânica presente no laboratório de Materiais de Construção localizado no Bloco L do Instituto Mauá de Tecnologia. A massa específica dos materiais foi determinada através de ensaio padronizado pela norma NBR NM 23:2001, com uso do frasco de Le Chatelier. Os resultados referentes às distribuições granulométricas estão apresentados a seguir na forma de gráficos (Figura 1 a Figura 4). Os resultados referentes à massa específica dos materiais estão apresentados na Tabela 1.

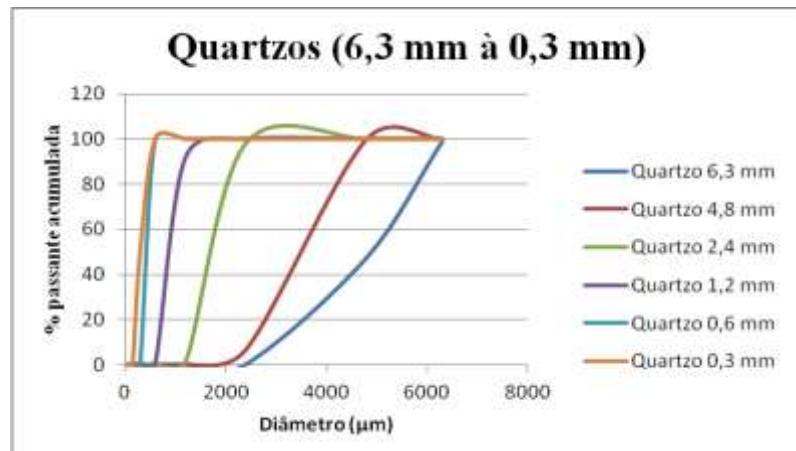


Figura 1 – Distribuição granulométrica de quartos (#6,3 a #0,3mm).

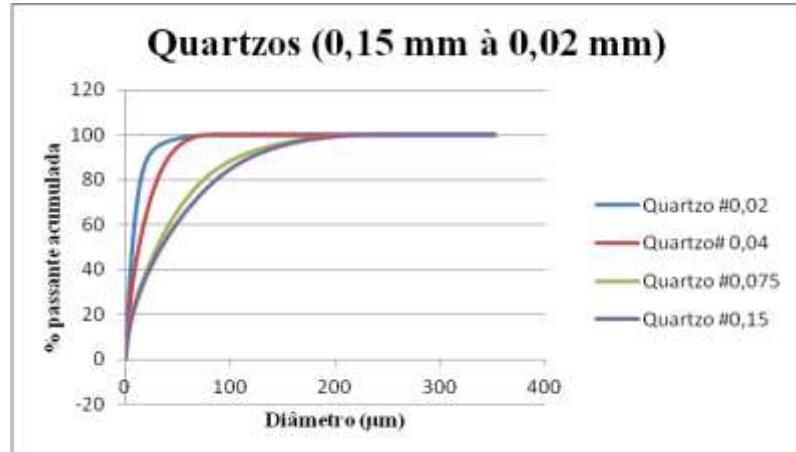


Figura 2 – Distribuição granulométrica de quartos (#0,15 a #0,02mm).

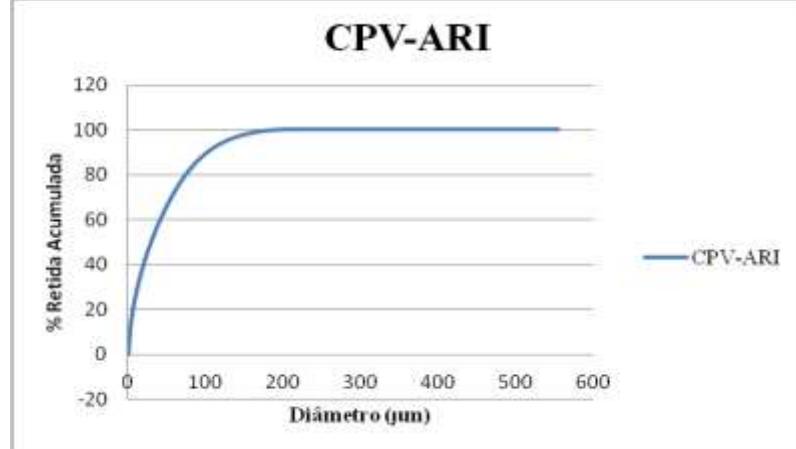


Figura 3 – Distribuição granulométrica do CPV-ARI.

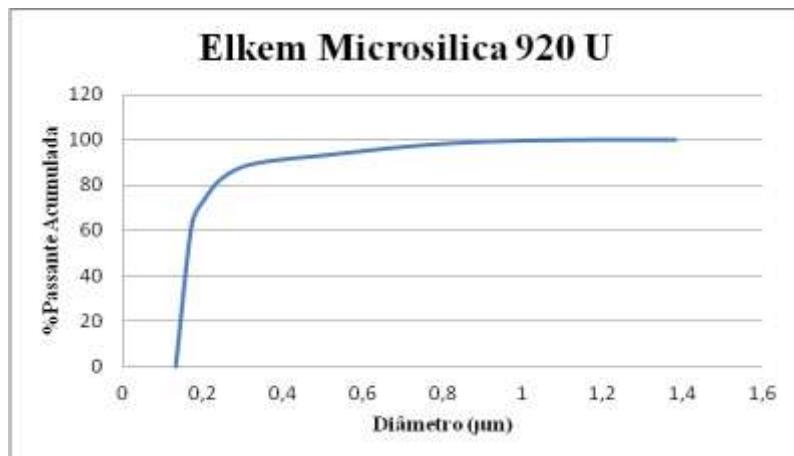


Figura 4 – Distribuição granulométrica da microssílica.

Tabela 1– Resultados das massas específicas dos materiais utilizados.

	Quartzos (#6,3 à #0,02mm)	CPV-ARI	Microsilica 920 U
<b>Massa Específica [g.cm<sup>-3</sup>]</b>	2,65	3,02	2,2

Para a execução dos ensaios de resistência à compressão no estado endurecido, foram preparados corpos de prova cilíndricos ( $\phi = 50$  mm;  $h = 100$  mm).

#### Dosagem das Misturas

A dosagem das misturas foi realizada a partir do modelo de Andreassen. Foram definidos os valores de 0,27, 0,32 e 0,37 para os coeficientes de empacotamento, gerando 3 formulações distintas.

Para aplicação do modelo de Andreassen foi utilizado o software disponibilizado pela empresa Elkem, chamado EMMA (Elkem Materials Mixture Analyser). Adicionando como dados de entrada as caracterizações granulométricas, a massa específica dos materiais, o modelo de empacotamento a ser utilizado (Andreassen ou Alfred), o valor do diâmetro da maior e da menor (no caso do modelo de Alfred) partícula da mistura e o coeficiente de distribuição (q), o programa fornece a curva granulométrica resultante do modelo teórico utilizado, tanto em formato de tabela, como na forma gráfica.

Com base na curva teórica fornecida, são inseridas as quantidades de cada material utilizado, buscando um ajuste perfeito da curva da mistura à teórica. Portanto, com o uso deste programa, foi possível formular traços distintos, alterando as quantidades de cada material até alcançar a distribuição granulométrica que mais se aproximasse da fornecida pelo modelo de Andreassen.

As formulações obtidas para cada coeficiente de distribuição estudado estão apresentadas na Tabela 2 a seguir. Os gráficos abaixo (Figura 5, Figura 6 e Figura 7) mostram, para cada traço, a curva granulométrica ideal segundo o modelo de Andreassen (vermelho), junto à distribuição granulométrica da mistura (azul). Estes gráficos foram retirados do programa EMMA utilizado para a dosagem dos traços.

Tabela 2– Formulações dos traços de concreto.

Diâmetro máximo (4,8mm)	Traço 1	Traço 2	Traço 3
q (coef. de distribuição)	0,27	0,32	0,37
Cimento (CP V-ARI)	1	1	1
Microssílica	0,2	0,2	0,2
Quartzo 6,3mm	0,75	0,4	1,283
Quartzo 4,8mm	1	1,5	1,5
Quartzo 2,4mm	0,0833	0,834	1,167
Quartzo 12mm	0,333	0,5	0,8
Quartzo 0,6mm	0,25	0,167	0,5
Quartzo 0,3mm	0,25	0,117	0,357
Quartzo 0,15mm	0,0333	0,0275	0,133
Quartzo 0,075mm	0,0833	0,167	0,238
Quartzo 0,04mm	0,075	0	0
Quartzo 0,02mm	0,25	0,340	0,333
Aditivo ADVA CAST 585	0,02	0,02	0,02
Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	509,05	430,87	315,15
Consumo de ligantes totais (Kg/m <sup>3</sup> )	610,85	517,04	378,17
Fator a/c	0,35	0,35	0,35

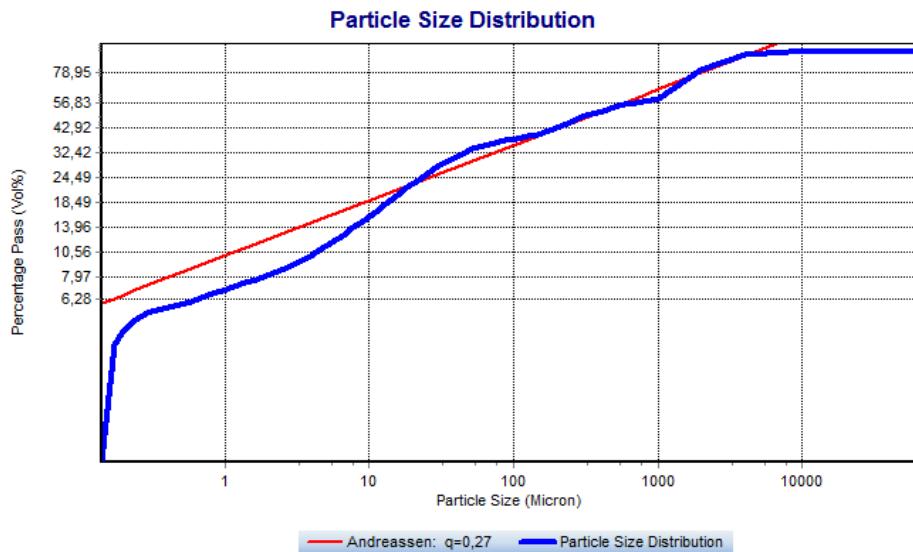


Figura 5 – Curva granulométrica do traço 1, formulado com  $q=0,27$ .

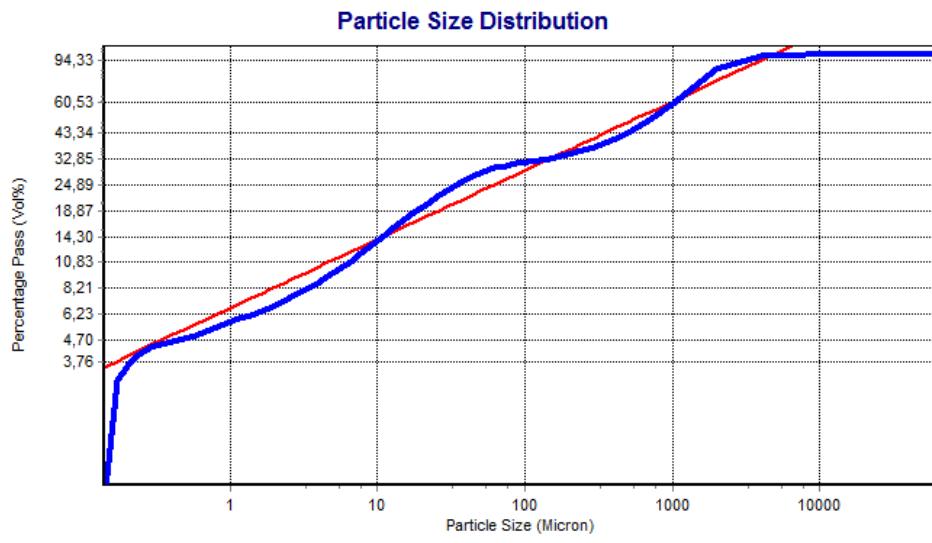


Figura 6 – Curva granulométrica do traço 2, formulado com  $q=0,32$ .

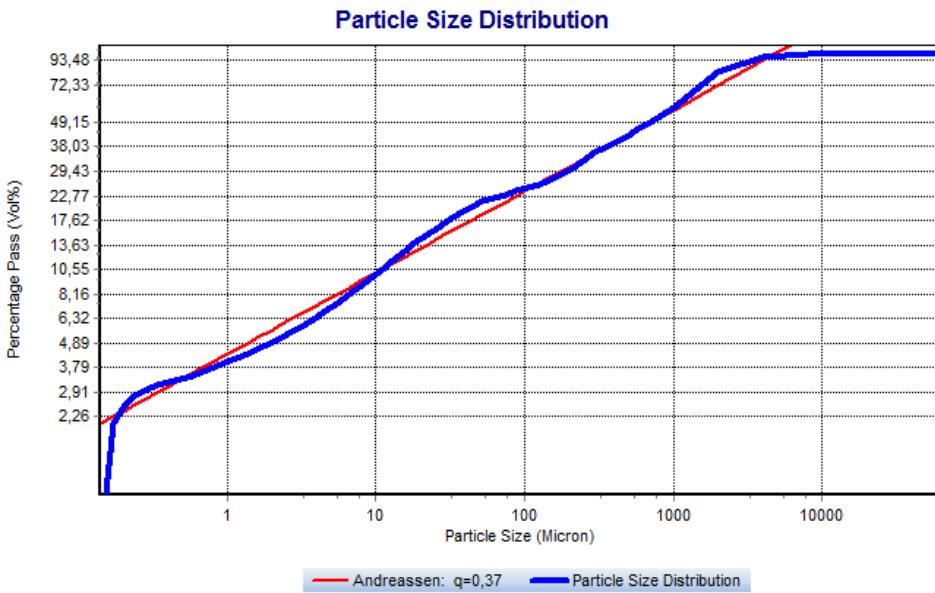


Figura 7 – Curva granulométrica do traço 3, formulado com  $q=0,37$ .

Observa-se nas formulações dos traços que, quanto menor o valor do coeficiente de empacotamento utilizado, maior a quantidade de partículas finas ( $<1\mu\text{m}$ ) necessárias para aproximar ao máximo a curva de distribuição granulométrica do modelo à curva de distribuição granulométrica real da mistura. Portanto, torna-se cada vez mais difícil alcançar o empacotamento utilizando-se deste modelo com coeficientes baixos, pois é necessária uma quantidade muito grande de microssílica, o material mais fino utilizado nas misturas, que se trata de uma adição ao cimento. Sendo assim, quanto maior a quantidade de microssílica utilizada, maior a quantidade de cimento necessária na mistura, e consequentemente é preciso consumos muito altos de cimento para misturas dosadas com coeficientes de distribuição baixos aproximarem-se da curva teórica do modelo utilizado. No entanto, quando o coeficiente aproxima-se de 0,37 (empacotamento teórico máximo) é possível reduzir a quantidade de partículas finas, e como consequência ocorre a diminuição da quantidade necessária de microssílica empregada na mistura, o que possibilita reduzir o consumo de cimento significativamente.

#### Preparação das Misturas

Para a moldagem dos corpos de prova foi executada a seguinte metodologia:

- Com o auxílio de uma balança eletrônica, fez-se a separação dos materiais para posterior mistura;
- Os agregados foram misturados e pré-molhados para evitar a absorção da água de amassamento, destinada a hidratar o cimento;
- Foi feita a homogeneização dos agregados de forma manual inicialmente e posteriormente com um misturador;
- Adicionou-se o cimento e a sílica ativa à mistura, e novamente homogeneizou-se;
- O aditivo superplastificante foi diluído na água de amassamento, e a água foi adicionada aos poucos, enquanto misturavam-se os materiais com auxílio do misturador;
- Misturaram-se os materiais entre 10 e 15 minutos até que fosse atingida uma consistência adequada para moldagem dos corpos de prova;

#### Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova cilíndricos ( $\phi=50\text{ mm}$  e  $h=100\text{ mm}$ ) foram moldados em três camadas iguais, adensadas na mesa vibratória.

Inicialmente foram moldados 7 corpos-de-prova respectivos a cada traço para determinação da sua resistência à compressão aos 7 e 14 e 28 dias de idade. Sendo 2 destes

rompidos aos 7 e aos 14 dias e os 3 restantes aos 28 dias. Posteriormente, os traços foram refeitos visando uma amostragem maior de dados a serem analisados, sendo moldados 6 corpos-de-prova respectivos a cada traço e rompidos todos a 7 dias. Todos eles foram curados em cura saturada, ficando submersos durante todo o período desde sua desmoldagem até o momento do rompimento. Todos os corpos-de-prova foram desmoldados no dia posterior à execução das misturas.

### Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos de resistência à compressão foram feitos atendendo a norma NBR 5739-2007. Cada corpo-de-prova teve o seu topo lixado buscando uniformidade da superfície e a seguir, com o auxílio de um paquímetro foram determinadas as suas dimensões. Após esse procedimento, cada corpo-de-prova foi posicionado no centro do prato inferior da prensa e então foi iniciado o ensaio. O carregamento foi aplicado continuamente com a prensa mecânica na opção velocidade de ensaio, até que ocorresse o rompimento, caracterizado por uma queda brusca na carga exercida pela prensa.

### **Resultados e Discussão**

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão neste trabalho apresentam-se a seguir. Os resultados referentes aos testes preliminares, a 7, 14 e 28 dias, encontram-se na Tabela 3, onde se apresentam os valores individuais das resistências à compressão e sua respectiva média a cada idade. Os dados da Tabela 34 e o gráfico da Figura 8 apresentam o comportamento das amostras ensaiadas na segunda etapa e rompidas aos 7 dias, mostrando em conjunto as resistências individuais de cada corpo-de-prova e a resistência à compressão média obtida nestes traços.

Tabela 3– Resultados obtidos nos testes preliminares.

	Consumo de Cimento [kg.m <sup>-3</sup> ]	Corpo-de-prova	f <sub>c</sub> (7 dias) [MPa]	f <sub>c</sub> (14 dias) [MPa]	f <sub>c</sub> (28 dias) [MPa]
Traço 1	509,05	A	57,96	53,26	69,95
		B	44,82	40,82	65,8
		C	-	-	56,16
		<i>f<sub>cm</sub> (resistência média)</i>	<b>51,39</b>	<b>47,04</b>	<b>63,97</b>
		<i>Rendimento (kg.m<sup>-3</sup> MPa<sup>-1</sup>)</i>	<b>9,9</b>	<b>10,8</b>	<b>8,0</b>
Traço 2	430,87	A	52,26	41,62	57,3
		B	31,63	55,76	66,3
		C	-	-	68
		<i>f<sub>cm</sub> (resistência média)</i>	<b>41,95</b>	<b>48,69</b>	<b>63,87</b>
		<i>Rendimento (kg.m<sup>-3</sup> MPa<sup>-1</sup>)</i>	<b>10,3</b>	<b>8,8</b>	<b>6,7</b>
Traço 3	315,15	A	56,76	62,00	61,55
		B	52,31	58,46	59,95
		C	-	-	70,85
		<i>f<sub>cm</sub> (resistência média)</i>	<b>54,54</b>	<b>60,23</b>	<b>64,12</b>
		<i>Rendimento (kg.m<sup>-3</sup> MPa<sup>-1</sup>)</i>	<b>5,8</b>	<b>5,2</b>	<b>4,9</b>

Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios finais.

<i>Rendimento (kg.m<sup>-3</sup> MPa<sup>-1</sup>)</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<i>fcm (resistência média)</i>	
<b>Traço 1</b>	9,9	49,66	58,8	54,06	43,37	48,71	53,76	51,39
<b>Traço 2</b>	8,4	48,41	55,06	45,86	48,76	52,36	57,71	51,36
<b>Traço 3</b>	6,7	46,5	43,97	41,17	56,31	40,57	51,91	46,74



Figura 8 – Resultados obtidos nos ensaios finais (Tabela 3).

Os resultados obtidos neste estudo, mostraram que foi possível no *Traço 3* otimizar a distribuição granulométrica dos materiais. Este fato deve-se primeiramente ao coeficiente de distribuição utilizado na sua dosagem ( $q=0,37$ ), o qual proporcionaria a distribuição granulométrica que permite o máximo empacotamento das partículas, segundo a literatura. Além disso, pode-se observar que dentre os traços dosados, este foi o que mais se aproximou da curva granulométrica ideal, devido a maior facilidade de ajuste da curva pela necessidade de uma menor quantidade de finos (Microssílica). Portanto este traço apresenta a maior densidade de empacotamento entre os traços estudados. Isso pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 3, uma vez que o rendimento alcançado com ele foi, em todos os ensaios, muito superior aos demais. Nos testes finais, no qual o *Traço 3* apresentou pior rendimento, alcançou, ainda assim, um rendimento aproximadamente 32% melhor do que o *Traço 1*, com uma redução de consumo de cimento de  $3,2 \text{ kg.m}^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ . Como consequência, foi possível atingir resistências próximas às do *Traço 1*, mesmo com um consumo de cimento 38,1% menor do que este. A grande dificuldade encontrada neste traço, no entanto, foi sua trabalhabilidade, que gerou dificuldades de adensamento, fato que pode ser observado na Figura 9, dificultando a reprodução dos resultados obtidos inicialmente e gerando um desvio maior do que o desejado entre as resistências obtidas nos ensaios.

Outra observação a ser considerada, é que devido à amostragem inicial pequena, os corpos-de-prova do *Traço 1*, obtiveram uma resistência média menor aos 14 dias do que aos 7 dias, o que não era esperado. Os fatores que interferem negativamente nas resistências dos corpos-de-prova são a presença de bolhas de ar incorporadas no adensamento, a presença de microssílica aglomerada na mistura, que prejudica a homogeneidade da mesma, além de possíveis irregularidades no topo do corpo-de-prova nos ensaios de resistência à compressão.

O *Traço 2* inicialmente apresentou um valor discrepante dos demais (Tabela 3 - corpo-de-prova B - 7 dias), ocasionado pelos mesmos motivos que as variações observadas no *Traço 1*, no entanto, as demais amostragens possibilitam descartar esse resultado obtido visto que este traço obteve resistências muito superiores a esta em todos os demais rompimentos.



Figura 9 – Falha de adensamento na produção do corpo-de-prova do Traço 3.

## Conclusões

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho conclui-se que a distribuição granulométrica da mistura possui grande influência na resistência mecânica do concreto endurecido. Observou-se que com a correta seleção das quantidades dos materiais a serem utilizados em cada traço é possível otimizar significativamente o empacotamento de partículas no concreto, de forma a aumentar o rendimento dos traços dosados e aumentar a resistência à compressão para um mesmo consumo de cimento.

Este fato pode ser observado principalmente através do *Traço 3*, que representaria o traço com maior densidade de empacotamento entre os dosados. Desta forma, apesar da dificuldade de moldagem apresentada neste traço, o seu rendimento nos ensaios em que apresentou sua pior performance (Tabela 4), foi aproximadamente 32% melhor em relação ao rendimento do *Traço 1* no mesmo ensaio. Ao considerar a média dos rendimentos entre estes 2 traços em todos os ensaios realizados, o *Traço 3* apresentou um rendimento aproximadamente 41% melhor do que o *Traço 1*, ou ainda uma redução de 4kg de cimento por metro cúbico de concreto para uma determinada resistência.

Outro importante resultado obtido é que nos ensaios realizados verificou-se que o rendimento médio obtido dentre os traços estudados, foi proporcional ao ajuste da curva de distribuição granulométrica da mistura à curva teórica do modelo de Andreassen. Isso pode ser observado uma vez que o *Traço 1*, que mais afastou-se do modelo teórico, apresentou pior rendimento, enquanto o *Traço 2*, melhor ajustado a curva do que o primeiro obteve rendimento superior a este, e o *Traço 3*, alcançou o maior rendimento entre eles, aproximando-se ainda mais ao modelo teórico utilizado (figuras 5,6 e 7).

Sendo assim, verificou-se que é possível ao estudar o empacotamento de partículas na dosagem do concreto, alcançar resistências à compressão semelhantes às de traços com consumos superiores de cimento, reduzindo assim a quantidade necessária deste material para uma mesma resistência, alterando apenas a composição do traço utilizado e consequentemente sua distribuição granulométrica.

Se estes resultados fossem realmente aplicados à construção civil, traria uma redução na quantidade de cimento utilizada em obras, o que acarretaria em benefícios econômicos e ambientais, tendo em vista o alto custo econômico e o grande impacto ambiental causado por este material. No entanto, a maior dificuldade do *Traço 3*, que proporcionou o melhor rendimento obtido, foi a sua trabalhabilidade limitada, o que dificultaria uma aplicação real. Uma possível solução para este fato seria o estudo de outros aditivos que proporcionariam diferentes comportamentos reológicos.

O *Traço 2* seria uma alternativa viável por apresentar uma relação intermediária entre o desempenho e o consumo de cimento, proporcionando uma resistência equivalente a do *Traço 1* com uma redução de  $78,18 \text{ kg.m}^{-3}$  de cimento em relação ao primeiro, sendo adensável por vibração sem grandes dificuldades.

Ainda assim, todos os traços estudados apresentaram um ótimo desempenho tendo em vista os concretos convencionais, devido além da dosagem do concreto de forma a

proporcionar uma baixa porosidade, à adição mineral utilizada (Microssílica), aos agregados de boa qualidade, ao aditivo superplastificante, e ainda à baixa relação água/cimento.

As limitações do modelo teórico utilizado neste trabalho devem-se ao fato de considerar o formato das partículas perfeitamente esféricas. No entanto, verificou-se através das resistências à compressão dos traços e de seus respectivos rendimentos, que este modelo apesar de não alcançar a ausência total de vazios no concreto produzido, é capaz de reduzi-lo, possibilitando então uma redução no consumo de cimento para alcançar uma resistência à compressão equivalente.

## Referências Bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- NBR 5739**, Concreto- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- NBR NM 23**, Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- Aiqin, W., Chengzhi, Z., Ningsheng, Z. (1997) Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement, *Cement Concrete Research*, **27**, 5, 685-695.
- Aiqin, W., Chengzhi, Z., Ningsheng, Z. (1999) The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, *Cement Concrete Research*, **29**, 11, 1721-1726.
- Barbosa, M. P. (2008) Concreto fresco: influência do empacotamento de partículas e outros fatores. *Introdução à ciência dos materiais aplicados à engenharia civil*, UNESP Ilha Solteira. Disponível em: <http://www.dec.feis.unesp.br/monica/p9.ppt>. Acesso em: 17 ago. 2012.
- Castro, A. L., Pandolfelli, V. C. (2009) Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, **55**, 18-32.
- De Larrard, F., Sedran, T. (1994) Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, *Cement Concrete Research*, **24**, 6, 997-1009.
- Elkem Silicon Materials, Software EMMA . Disponível em <http://www.elkem.com/en/silicon-materials/support/software-emma/>. Acesso em 29 ago. 2013
- Myhre, B., Hundere, A. M. The use of particle size distribution in development of refractory castables. In: ALAFAR Congress, XXV., 1996, San Carlos de Bariloche, *Anais...* Elkem Materials, 1996.
- Oliveira, I. R.; Studart, A. R.; Pileggi, R. G.; Pandolfelli, V. C. (2000). Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 195 p.