

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE EMPACOTAMENTO NAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

Rafael Rebelo Simões Nobre<sup>1</sup>, Adriano dos Guimarães de Carvalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso Superior em Engenharia Civil – IFTO. Bolsista do Programa de Iniciação Científica. e-mail: <rafaelrnsnobre.lds@gmail.com>

<sup>2</sup>Docente do IFTO – Campus Palmas. Bolsista do Programa PAP/PQ/IFTO. e-mail: [agcarvalho@ifto.edu.br](mailto:agcarvalho@ifto.edu.br)

**Resumo:** Este trabalho de pesquisa objetivou avaliar a influência do empacotamento de partículas granulares de materiais finos (agregado miúdo, microsilica e quartzo), nas propriedades de concretos de cimento Portland. A busca por concretos de elevada performance e que possam possibilitar construções duráveis e sustentáveis vem de longa data. Pesquisas relacionadas ao empacotamento de partículas podem contribuir para a produção de materiais cimentícios com menores consumo de cimento, reduzindo-se os vazios da mistura de grãos, e, por conseguinte, obtendo-se resultados de elevada performance. Neste sentido foi utilizado um traço padrão dosado a partir de uma adaptação do método Metha & Aïtcin, sendo que a partir deste, foram determinadas três misturas distintas. As diferenças entre elas ocorreram pela modificação nas porcentagens de areia normal e pó de quartzo (o fator água/aglomerante foi mantido como constante) para três coeficientes de empacotamento distintos (0,25; 0,30 e 0,35). Os estudos indicaram que a otimização dos grãos (melhor empacotamento) contribuiu de forma bastante positiva para a produção de misturas menos porosas, maior resistência mecânica, com performance melhorada e mais sustentáveis (possibilitando menor consumo de cimento).

**Palavras-chave:** concreto, desempenho, empacotamento

### 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia do concreto tem se desenvolvido de forma acelerada nas últimas décadas, como por exemplo o Concreto de Alto Desempenho - CAD, o Concreto de Ultra Alto Desempenho – CUAD, o Concreto de Pós-Reativos – CPR, Concretos com Fibras, dentre outros. Atualmente, estudos estão sendo desenvolvidos no sentido de se buscar misturas cimentícias mais sustentáveis (com menor consumo de cimento), pois a produção de cimento, além de necessitar de elevada quantidade de energia, cerca de 3,65 GJ por tonelada de Clínquer (matéria prima do cimento) (TAYLOR, *et al.*, 2006) e despeja, no Brasil, cerca de 590 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada na atmosfera (SNIC, 2019).

No início do século passado, estudos de distribuição granulométrica realizados por Füller e Thompson (FÜLLER E THOMPSON, 1907), já indicavam que os agregados com distribuição granulométrica contínua proporcionavam melhores propriedades aos concretos e argamassas. Percebeu-se então que se tivéssemos proporções de grãos abrangendo toda a faixa granulométrica se poderia em teoria empacotar a mistura, ou seja, eliminar todos os vazios.

Alguns dos problemas enfrentados no empacotamento de partículas estão relacionados ao custo de produção, na definição das melhores proporções dos materiais necessários, na necessidade de se utilizar materiais com finuras cada vez menores e num maior consumo de água.

Existem grandes desafios para se conseguir misturas de alta performance com elevados coeficientes de empacotamento, visto que o aumento na demanda de água proporciona uma redução das resistências mecânica e acréscimo da quantidade de poros. Vale ressaltar também que se os índices de empacotamento forem muito agressivos, há grande dificuldade em se permitir a entrada da água

necessária à hidratação dos grãos de cimento. A grande dificuldade ficaria atrelada a se encontrar misturas empacotadas nas quais possam atender as exigências de resistência e durabilidade, garantindo um menor consumo de cimento.

Este trabalho empregou o modelo de empacotamento desenvolvido por Alfred (Castro, *et al.*, 2009) aliado ao programa de modelagem *EMMA*<sup>®</sup> (*Elkem Materials Mixture Analyser*) de forma a avaliar a consistência e resistência a compressão de misturas cimentícias com coeficientes de empacotamento (Q) de 0,20, 0,25 e 0,30.

## 2 METODOLOGIA

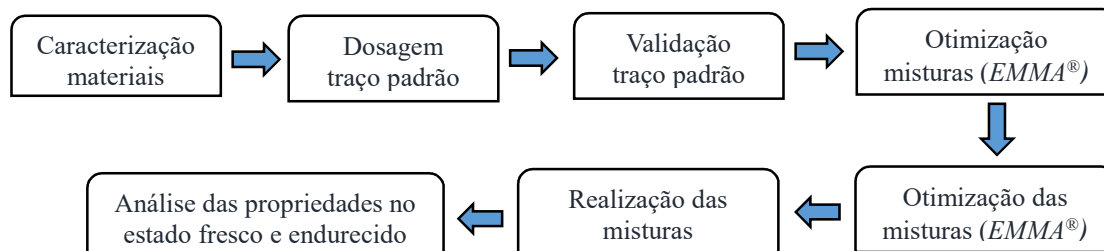
Trata-se de uma pesquisa aplicada, sendo que o programa experimental desenvolvido neste trabalho de pesquisa, compreendeu a caracterização dos materiais empregados, combinação dos materiais granulares (*EMMA*<sup>®</sup>), realização das misturas cimentícias, realização de ensaios no estado fresco e endurecido.

Os trabalhos de dosagem foram realizados no Laboratório de Materiais do IFTO – Campus Palmas. O concreto padrão escolhido (sem empacotamento) foi dosado pelo método adaptado de Metha & Aïtcin (resistência prevista de 50 MPa aos 28 dias) utilizando-se os seguintes materiais: cimento Portland, microssílica, areia natural, areia normal, pó de quartzo, aditivo e água.

Visando garantir um melhor resultado na otimização do empacotamento foram utilizados os seguintes materiais: areia natural na fração granulométrica correspondente a malha de peneira #2,36 mm, areia normal das malhas de peneiras #1,18; #0,6; #0,3 e #0,15 mm, pó de quartzo nas frações #0,075 e #0,05 mm. Os demais materiais empregados foram cimento Portland CP V – ARI 40 da marca Ciplan, microssílica Tecnosil e aditivo superplastificantes Sika Viscocrete 353 CB. Foi determinada a granulometria e massa específica dos materiais, além de propriedades de consistência pela NBR 13.276 (ABNT, 2016) e resistência à compressão pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Foram moldados 9 corpos de prova para cada mistura com resistências determinadas aos 28 dias de idade. Um fluxograma sintético é apresentado na Figura 1 de resumir as atividades desenvolvidas no programa experimental.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: próprio autor (2020).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os trabalhos de caracterização dos materiais desenvolveram-se segundo as técnicas exigidas nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Os resultados de massa específica das areias são apresentados na Tabela 3. A areia normal foi adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT.

Tabela 3 – Massa específica agregados miúdos

<b>Material</b>	<b>Areia natural (2,36 mm)</b>	<b>Areia normal (1,18 mm)</b>	<b>Areia normal (0,6 mm)</b>	<b>Areia normal (0,3 mm)</b>	<b>Areia normal (0,15 mm)</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,604	2,632	2,618	2,621	2,621

O pó de quartzo foi produzido pela diLuca Comércio, sendo sua massa específica realizada a partir da NM 23 (ABNT, 2001). O resultado do ensaio é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Massa específica quartzo

<b>Material</b>	<b>Quartzo 0,075 mm</b>	<b>Quartzo 0,050 mm</b>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,978	2,601

Empregado cimento Portland da marca Ciplan do tipo CP V – ARI 40, cujas algumas características são determinadas segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018). Conforme fabricante este material possuía massa específica de 3,0 g/cm<sup>3</sup>, com porcentagem de massa retida na peneira #200 de 6%. Microssilica da Tecnosil com características fornecidas pelo fabricante: massa unitária densificada maior que 350 kg/m<sup>3</sup>, superfície específica 19.000 m<sup>2</sup>/kg, diâmetro de partícula 0,20 µm e teor de SiO<sub>2</sub> maior que 90%.

Neste trabalho houve a preocupação da equipe de pesquisa, em avaliar inicialmente, se a quantidade de água determinada pelo método de dosagem adotado (Metha & Aïtcin adaptado), permitiria a molhagem de todos os grãos de cimento. Para tanto foram realizados experimentos modelos a fim de se avaliar o comportamento das misturas. Após as análises de plasticidade, optou-se, para a realização do trabalho de pesquisa, utilizar um fator água/aglomerante de 0,35 para as composições avaliadas neste estudo, considerando-se o empacotamento pretendido (0,20, 0,25 e 0,30), de forma a se garantir propriedades no estado fresco adequadas à sua utilização.

A densidade, quantidade e volume de cada um dos materiais granulares empregados, considerando seus respectivos coeficientes de empacotamentos são apresentadas nas tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 – Coeficiente de empacotamento de 0,25

<b>MATERIAL</b>	<b>DENSIDADE (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>QUANTIDADE (kg)</b>	<b>VOLUME (%)</b>
Cimento CP V - ARI RS	3	1	23,21

Sílica Ativa	3,5	0,5	11,6
Areia 2,36 mm	2,604	0,1	2,66
Areia 1,18 mm	2,624	0,9	23,92
Areia 0,6 mm	2,617	0,3	7,97
Areia 0,3 mm	2,621	0,3	7,94
Areia 0,15 mm	2,621	0,3	8
Quartzo 0,075 mm	2,978	0,4	9,35
Quartzo 0,0375 mm	2,6015	0,2	5,36

Tabela 6 – Coeficiente de empacotamento de 0,30

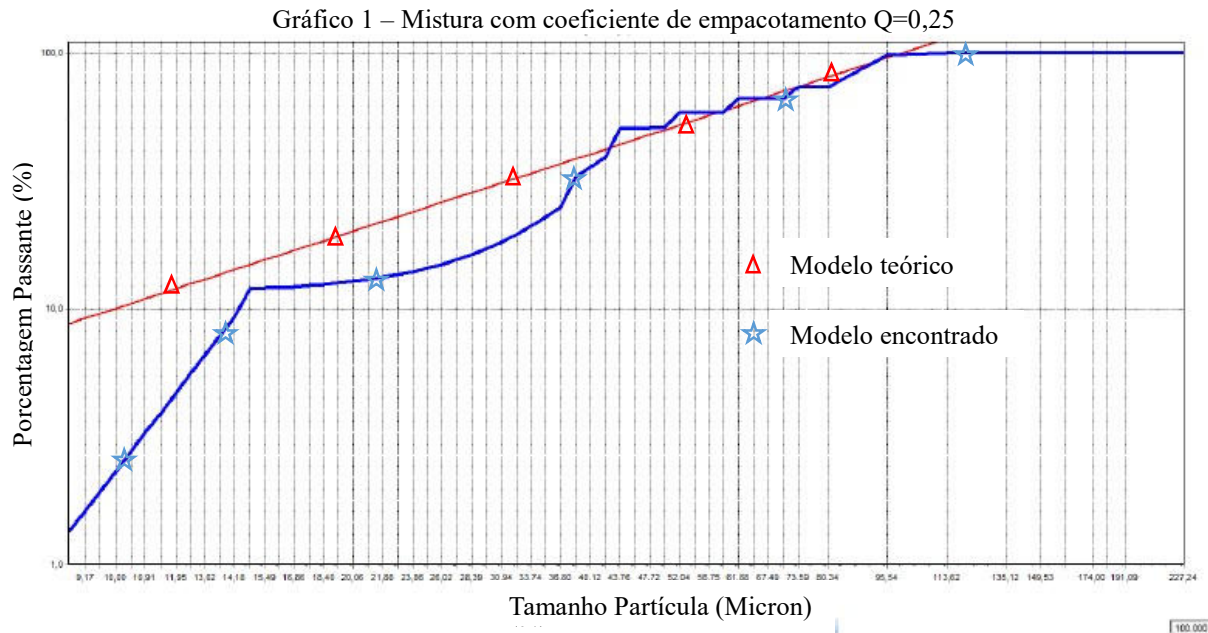
MATERIAL	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	QUANTIDADE (kg)	VOLUME (%)
Cimento CP V - ARI RS	3	1	25,62
Sílica Ativa	3,5	0,5	12,81
Areia 2,36 mm	2,604	0,6	17,6
Areia 1,18 mm	2,624	0,6	17,6
Areia 0,6 mm	2,617	0,6	17,6
Areia 0,3 mm	2,621	0,3	8,77
Areia 0,15 mm	2,621	0	0
Quartzo 0,075 mm	2,978	0	0
Quartzo 0,0375 mm	2,6015	0	0

Tabela 7 – Coeficiente de empacotamento de 0,35

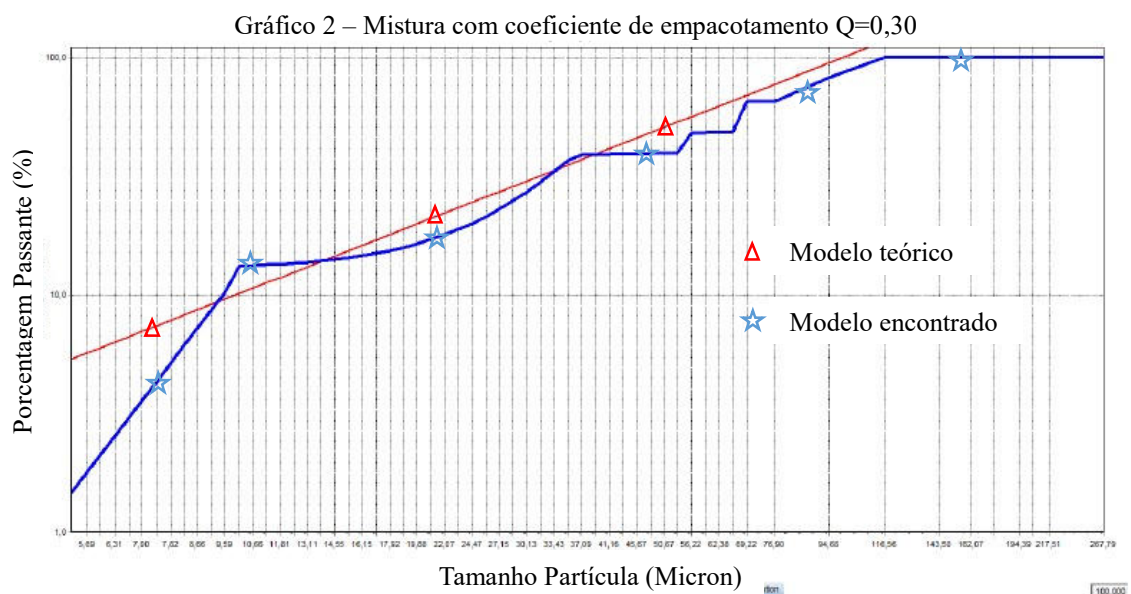
MATERIAL	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	QUANTIDADE (kg)	VOLUME (%)
Cimento CP V - ARI RS	3	1	20,55
Sílica Ativa	3,5	0,5	10,27
Areia 2,36 mm	2,604	0,4	9,41
Areia 1,18 mm	2,624	0,6	14,12
Areia 0,6 mm	2,617	0,6	14,12
Areia 0,3 mm	2,621	0,4	9,38
Areia 0,15 mm	2,621	0,4	9,45
Quartzo 0,075 mm	2,978	0,5	10,34
Quartzo 0,0375 mm	2,6015	0,1	2,37

Os resultados apresentados nas tabelas 5, 6 e 7 são fruto de simulações realizadas a partir do programa de *EMMA*<sup>®</sup>. Para as simulações são necessárias informações como a quantidade de material por faixa granulométrica, a massa específica, o tamanho do grão, dentre outros. O programa nos permite então determinar quais as quantidades de materiais devem ser utilizadas, para cada coeficiente de empacotamento. O objetivo é encontrar misturas que mais se aproximam das curvas de empacotamento teórico (máximo), sem, no entanto, produzir misturas cujos grãos de cimento apresentem dificuldades de serem molhadas.

Os resultados das curvas de otimização em relação ao empacotamento de cada uma das misturas realizadas a partir do *EMMA*<sup>®</sup>, geraram os seguintes resultados apresentados nos Gráficos 1, 2 e 3.



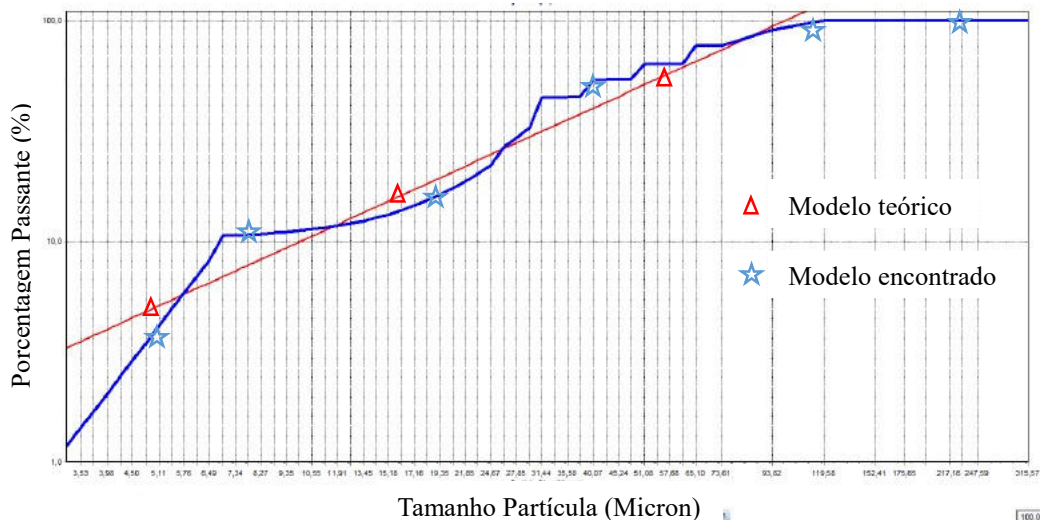
A curva com triângulos apresenta a curva de regressão ótima de empacotamento segundo o modelo de ANDREASSEN para  $Q=0,25$ . Neste caso foram realizadas simulações computacionais, considerando variações nos teores de areia natural, areia normal e pó de quartzo, visando se encontrar uma mistura (curva com estrelas), que se aproximasse o máximo possível da curva ótima de empacotamento.



Observa-se no Gráfico 2 que para um coeficiente de empacotamento  $Q=0,30$ , as simulações nos teores de agregados (areia natural, areia normal e pó de quartzo) permitem um melhor ajuste de

curva dos agregados (curva com estrelas) com a curva de empacotamento ótimo (curva com triângulos).

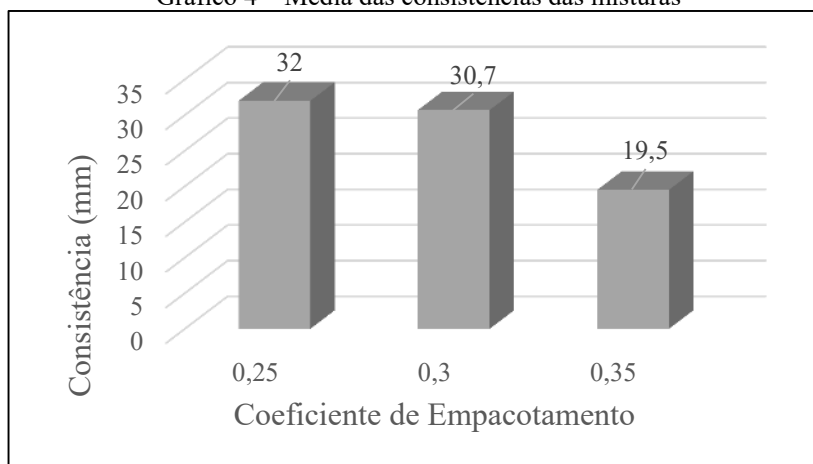
Gráfico 3 – Mistura com coeficiente de empacotamento  $Q=0,35$



Importante ressaltar aqui que com coeficiente de empacotamento de  $Q=0,35$  (Figura 3) se conseguiu um melhor ajuste na curva. Os resultados obtidos com coeficiente de 0,35 corroboram com aqueles encontrados por Funk e Dinger (1980) e Castro e Pandolfelli (2009).

Considerando que foram mantidas as mesmas condições de relação água/aglomerante em todas as misturas, o Gráfico 4 apresenta os resultados para o índice de consistência dos traços estudados.

Gráfico 4 – Média das consistências das misturas

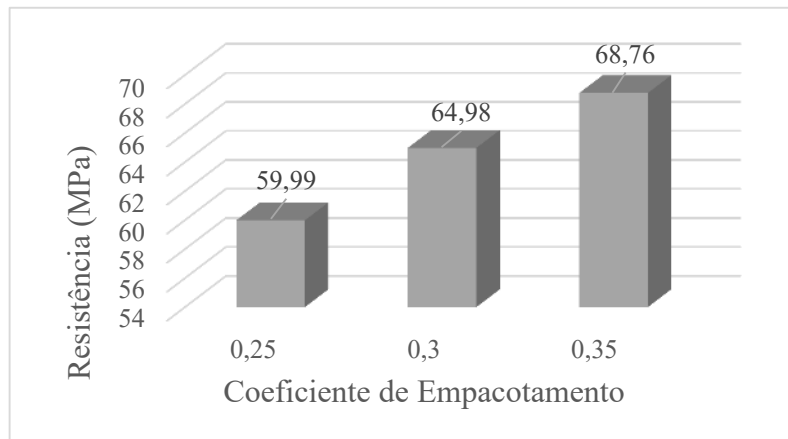


O Gráfico 4 indica que à medida que aumentamos o coeficiente de empacotamento, ocorre uma redução na quantidade de vazios, implicando numa maior dificuldade de a água de mistura lubrificar os materiais granulares. Isto provoca uma redução gradativa na consistência dos concretos. Resta acrescentar que misturas muito empacotadas poderão impedir o acesso da água aos grãos de cimento, resultando em concretos com menores resistências mecânicas. Pode-se observar também que o comportamento da consistência não apresenta característica linear, demonstrando uma forte redução

entre as faixas de empacotamento de 0,30 para 0,35.

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos traços aqui avaliados, em função do grau de empacotamento.

Gráfico 5 – Média das resistências a compressão das misturas



No Gráfico 5 observa-se ganhos de resistência mecânica, à medida que se promove melhores empacotamentos dos materiais granulares, considerando os valores avaliados neste estudo. Todavia, o ganho de resistência aqui apresentado, parece indicar uma característica mais linear, quando comparado ao gráfico de consistência.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicaram que é possível, a partir da teoria de empacotamento desenvolvida por Andreasen, se obter misturas cimentícias com vazios cada vez menores, variando-se o coeficiente de empacotamento (Q). Considerando os três coeficientes avaliados, o valor de 0,35 apresentou melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade, quando comparado àqueles obtidos com os valores de 0,30 e 0,25, corroborando com os resultados obtidos por Funk e Dinger (1980) e Castro e Pandolfelli (2009).

Todavia a pesquisa evidenciou uma redução significativa na consistência das misturas para valores de  $Q=0,35$ , indicando a possibilidade de uma maior dificuldade da distribuição da água entre as partículas granulares. Tal fato é indicativo de que, caso haja a realização de uma mistura com coeficientes de empacotamento maiores que 0,35, poderá haver uma grande redução nos vazios entre os grãos, incorrendo em dificuldade na molhagem das partículas de cimento, e por consequência, perda de desempenho (redução na resistência à compressão).

Como trabalhos futuros sugere-se a utilização do modelo de empacotamento desenvolvido por Alfred, pois se trata de um aperfeiçoamento do modelo de Andreasen, na qual o diâmetro da menor partícula da mistura é considerado.

## 5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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, **55**, 18-32, 2009.

Elkem Silicon Materials. **Software EMMA**. Disponível em: <<http://www.elkem.com/en/silicon-materials/support/software-emma>>. Acesso em 29 março de 2021.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO)**. New York, 1980.

FÜLLER, WILLIAN B.; THOMPSON, SANFORD E. *The Laws of Proportioning Concrete*. **American Society of Civil Engineers**. Vol. 59, Issue 2, 1907. DOI: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001979>.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. **Relatório Anual**. São Paulo, 2019. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2019.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf)>. Acesso em: 14 de maio de 2021.

TAYLOR, M.; TAM, C.; GIELEN, D. **Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions from the global cement industry**, IEA (Energy Technology Policy Division), 2006, 12 pg.