AVALIAÇÃO DE DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL

[1]*Larissa Fernandes Silva, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia campus Eunápolis.*

[2]*Catharine Pereira Brandão, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia campus Eunápolis.*

agripinolarissha@gmail.com

1. RESUMO

Existem metodologias para dosagem do concreto autoadensável (CAA) que apresentam um número elevado de etapas empíricas e repetitivas que exigem alta influência do operador. Entretanto, o processo de dosagem será cada vez mais preciso quanto melhor o controle das influências externas e mais científico for o tratamento de dados. Com isso, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar os métodos tradicionais de dosagem do CAA frente ao método estatístico de mistura. Para isso, a partir da revisão da literatura e análise qualitativa do procedimento propostos por quatro metodologias tradicionais e o método estatístico, com base nos critérios: número de etapas de execução e técnica estatística, inferiu-se a influência nos parâmetros tempo de execução, desempenho, influência do operador e custo que estão relacionados com a qualidade final do produto. Dias *et al.* (2010) e Dias *et al.* (2019) relataram aplicação do método estatístico para produção de materiais cimentícios com adições semelhantes ao que ocorre no desenvolvimento do CAA. Foi possível inferir que é fundamental incorporar premissas de controle de qualidade e redução do empirismo para tornar o processo de dosagem mais preciso, assertivo e eficiente. Benefícios que podem ser ainda mais potencializados quando se faz uso de *softwares* para auxiliar. Além disso, infere-se que o método

ISBN: 978-65-89908-00-5

estatístico tem potencial para dosar também o CAA com qualidade e otimização de uso dos recursos e energia.

Palavras-chaves: concreto autoadensável; dosagem, otimização; método estatístico de mistura.

2. ABSTRACT

There are methodologies for self-compacting concrete (SCC) mixture design that present a high number of empirical and repetitive steps, which require a high influence of the operator. However, the better the control of external influences and the more scientific the data treatment, the more accurate the dosage process will become. With this in mind, the present work aims to evaluate the traditional methods of SCC dosage in view of the statistical method of mixture. For this, from the literature review and qualitative analysis of the procedure proposed by four traditional methodologies and the statistical method, based on the criteria: number of execution steps and statistical technique, it was inferred the influence on the parameters execution time, performance, operator influence and cost, which are related to the final quality of the product. Dias *et al.* (2010) and Dias *et al.* (2019) reported application of the statistical method for production of cementitious materials with additions similar to what occurs in the development of SCC. It was possible to infer that it is essential to incorporate quality control assumptions and reduce empiricism to make the dosage process more accurate, assertive, and efficient. Benefits that can be further enhanced when software is used to assist. Moreover, it is inferred that the statistical method also has the potential to dose SCC with quality and optimize the use of resources and energy.

Key-words: self – compacting concrete; mixture design, optimization; Statistical mixture design.

ISBN: 978-65-89908-00-5

3. INTRODUÇÃO

O concreto é o elemento manufaturado mais utilizado na construção civil. No entanto, a mistura convencional apresenta deficiências para lançamento e adensamento de peças densamente armadas e com formatos geométricos complexos, podendo ser beneficamente substituída pelo concreto autoadensável (CAA) para estas condições (GOMES, 2002; GOMES e BARROS, 2009).

O CAA é composto pelas matérias-primas do concreto tradicional junto à adição de uma significativa quantidade de finos e emprego de aditivos químicos superplastificantes, sendo mais eficientes os aditivos à base de policarboxilatos (GOMES, 2002; GOMES e BARROS, 2009).

Para o CAA é essencial a adequada interação entre os constituintes, para produzir composto com menor tensão de escoamento e maior viscosidade plástica, ou seja, com reologia que o distingue dos usuais. Adicionalmente, permite que a mistura tenha o comportamento autoadensável, que representa a habilidade de fluir pelas armaduras e/ou seções estreitas a partir do próprio peso, mantendo-se homogênea e coesa, sem vibração mecânica (GOMES, 2002; GOMES e BARROS, 2009).

A dosagem é etapa fundamental e complexa do processo de produção de uma mistura, que consiste na determinação adequada da proporção dos componentes (GOMES e BARROS, 2009).

O primeiro método de dosagem reconhecido cientificamente foi proposto por Okamura *et al.* (1998) e fundamenta-se em três princípios: limitação e definição da quantidade dos agregados, baixa relação água/finos e uso de aditivo superplastíficante. É indicada a proporção dos agregados graúdo e miúdo em 50% do volume de sólidos e 40% do volume de argamassa, respectivamente, gerando estabilização no interior da composição (GOMES e BARROS, 2009). Todavia, por se tratar do método introdutório não havia técnica precisa para determinação da relação água/materiais finos e quantidade de superplastíficante.

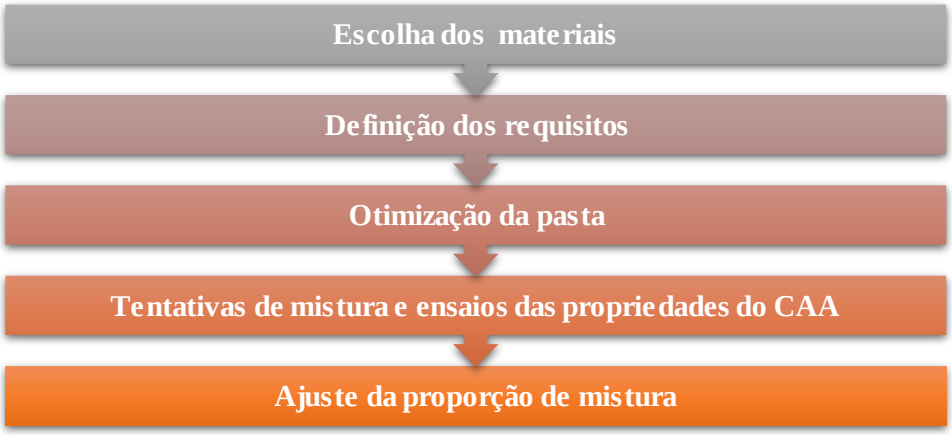
ISBN: 978-65-89908-00-5

Consequentemente, este trabalho objetiva avaliar os principais métodos desenvolvidos para dosagem de concreto autoadensável comparando-os entre si e também com o método estatístico de mistura.

4. MÉTODOS TRADICIONAIS

Nan Su *et al.* (2001) estabelecem um procedimento, conforme Figura 1, com ensaios para controle de qualidade da pasta e argamassa, além de fatores para indicar a quantidade de cada constituinte da matriz, a fim do preenchimento dos vazios por diferentes grãos de adições minerais inertes e agregados.

Figura 1 – Resumo das etapas do método de dosagem proposto por Nan Su *et al.* (2001).



Fonte: Adaptado de GOMES e BARROS (2009).

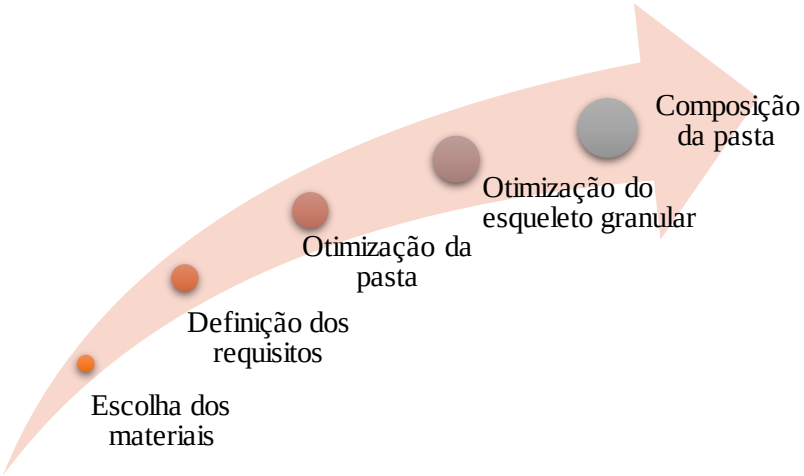
Quando as observações dos ensaios de controle de qualidade não são satisfatórias, os autores recomendam ajustes nas proporções do traço, de modo empírico e com base na observação do responsável pela produção.

A metodologia de Gomes (2002) e Gomes, Gettu e Agulló (2003) se assemelham e o procedimento é descrito conforme Figura 2. A metodologia possui três fases: obtenção

ISBN: 978-65-89908-00-5

da composição da pasta, determinação da proporção da mistura dos agregados e determinação da composição da pasta (GOMES e BARROS, 2009).

Figura 2 – Etapas dos métodos Gomes (2002) e Gomes, Gettu e Agulló (2003).



Fonte: Adaptado de GOMES e BARROS (2009).

Esses métodos possuem fases independentes para a dosagem do concreto, ou melhor, reduzem as variáveis do sistema colocando que a composição da pasta não interfere na proporção de agregados mesmo tendo como fundamento, assim como Nan Su *et al.* (2001), que a viscosidade e fluidez da pasta são responsáveis por conduzir o comportamento do fluxo do concreto.

Com isso, a determinação dos parâmetros da composição é autônoma e de caráter experimental em que se otimiza a pasta e o esqueleto granular individualmente, caracterizando um procedimento de dificultoso cumprimento, fator que se assemelha ao método desenvolvido por Tutikian (2004).

O método Tutikian (2004) está descrito na Figura 3, sendo o desenvolvimento do CAA partindo de um concreto convencional (CCV), conforme o procedimento lPT/EPUSP, elaborado por Helene e Terzian. Dessa forma, inicia-se a dosagem através

ISBN: 978-65-89908-00-5

dos componentes básicos do concreto: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, adiante finos e superplastificantes (GOMES e BARROS, 2009).

Figura 3 – Etapas do Método Tutikian (2004).

Fonte: Adaptado de TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008).

Esta metodologia tem como princípio a moldagem de três traços de concreto – pobre, intermediário e rico – a fim de que se possa desenhar um diagrama de dosagem, insuficiente para caracterizar e avaliar o comportamento de um concreto tão complexo de otimizar como o concreto autoadensável.

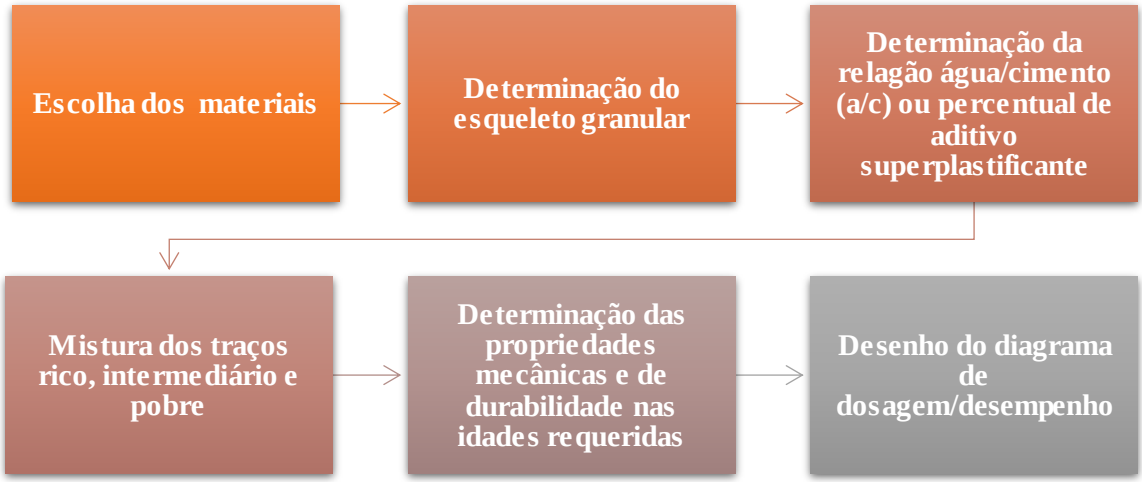
Apesar da metodologia ter sido utilizada por autores, a exemplo de: Geyer (2005), Alencar e Helene (2006), Ferreira *et al.* (2006), Pagnussat *et al.* (2006) e Silva (2008), necessitou de aperfeiçoamento em relação à determinação de um baixo teor de argamassa (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O procedimento não sugere estudo prévio dos agregados, determinando-se aleatoriamente a proporção das classes de agregados graúdos. Tutikian e Dal Molin (2007) reestruturaram as etapas e a metodologia básica de Tutikian (2004), sendo

ISBN: 978-65-89908-00-5

ilustrada na Figura 4, retificando os pontos desfavoráveis e acrescentando inovações, como o teor de argamassa variável e análise estatística com a elaboração da curva de custo no diagrama de dosagem e diagrama de desempenho.

Figura 4 – Resumo das etapas do Método Tutikian-Dal Molin (2007).



Fonte: Adaptado de TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008).

Embora a reformulação permita um proporcionamento de CAA eficaz, algumas fases se semelham às do método Tutikian (2004). Porém, no campo estatístico, demanda modelagem do comportamento de cada uma das propriedades estudadas e os coeficientes de determinação de quão ajustados estão as curvas dos diagramas que compõem o método.

5. MÉTODO ESTATÍSTICO DE MISTURA

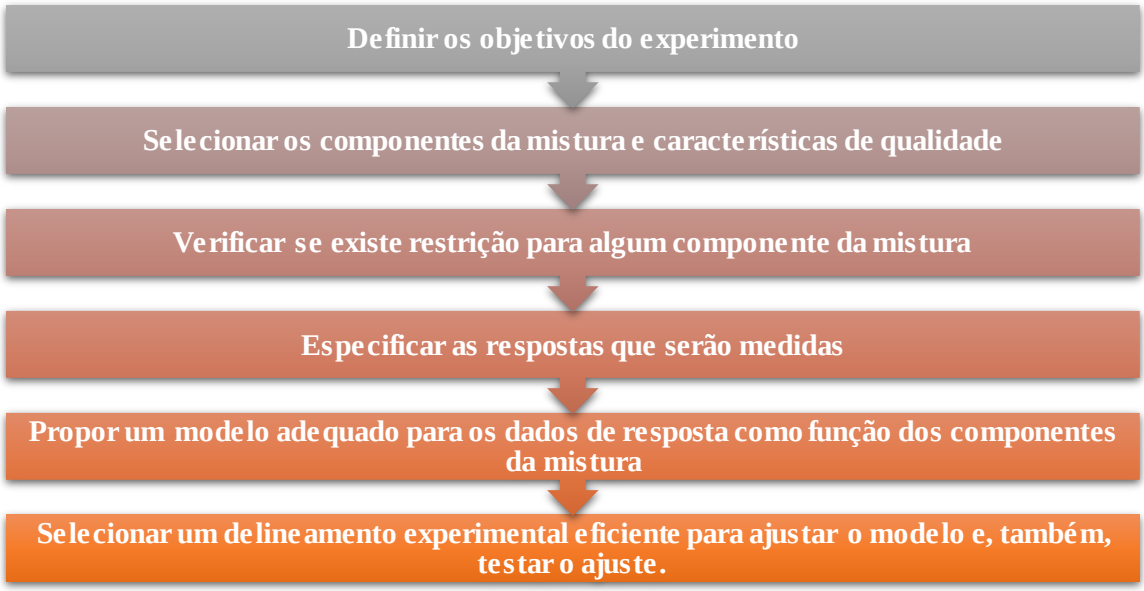
Segundo Paese (1997), o objetivo do programa experimental de mistura é modelar uma superfície de reposta na forma de uma equação matemática, a fim de estimar uma resposta para alguma mistura ou medir a influência de algum componente ou da combinação deles na mistura. Em experimentos com misturas de dois ou mais

ISBN: 978-65-89908-00-5

componentes, as proporções dos elementos não são independentes e a soma das frações dos ingredientes é igual a 1. Essa definição norteia o método estatístico de misturas.

O procedimento experimental, descrito na Figura 5, pode ser realizado com o intermédio de *softwares* como o minitab *e Design Expert*, com o diferencial que as interações são geradas em diagramas simplex e análise de variância (ANOVA), segundo a regra de ajuste linear ou dos polinômios de Henry Scheffé (1958), para os quais o melhor ajuste é determinado por avaliação dos parâmetros coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (adj - R^2) e o valor F do teste de variância.

Figura 5 – Etapas do método estatístico de mistura.



Fonte: Adaptado de PAESE (1997).

É possível compreender as propriedades da combinação entre cada material da matriz, fundamentadas nas estimavas de valores demonstradas por um modelo de superfície de resposta que auxilia na identificação da melhor adequação dos constituintes e dos fatores que afetam as soluções desejadas, garantido resultados confiáveis e consistentes, conforme DIAS *et al.* (2019).

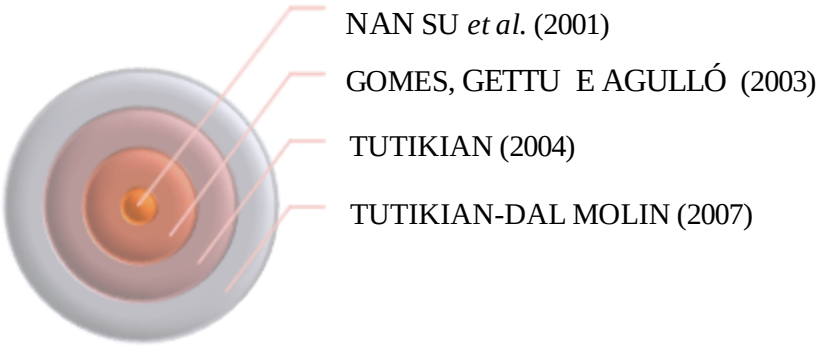
ISBN: 978-65-89908-00-5

Com o intuito de atingir a assertividade, economia e redução do número de experiências e repetições para a proporção de compostos, tem-se executado experimentos com misturas, de acordo a Figura 5, também na construção civil, para dosagem de argamassas (DIAS *et al*., 2019) e argamassas com gradação funcional de fibras (DIAS *et al*., 2010). Com isso, os estudos introduzem esse novo conceito com potencial para dosagem e otimização de compósito cimentício com gradação com foco no custo e performance mecânica para aplicações na construção civil.

6. METODOLOGIA

Esse trabalho é uma revisão da literatura, em que a análise qualitativa foi aplicada para avaliação comparativa entre os métodos de dosagem de CAA. Foram selecionados quatro métodos tradicionais com reconhecimento da comunidade científica na produção de CAA desenvolvidos no período de 2000 - 2010, conforme Figura 6.

Figura 6 – Métodos tradicionais de dosagem para CAA selecionados.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os métodos tradicionais selecionados e o método estatístico de mistura foram avaliados quanto ao critério:

ISBN: 978-65-89908-00-5

- Etapas de execução: quantidade total de etapas de realização do procedimento.
- Técnica estatística aplicada.

O número total de etapas tem influência sobre os aspectos tempo e custo de execução, enquanto a análise estatística está vinculada à qualidade do procedimento, neste trabalho será tratado como critério que define o aspecto "Influência do operador" e desempenho.

Realizou-se também a classificação dos parâmetros: quantidade de etapas estatística, tempo de execução, desempenho e Influência do operador. Com isso, detalha-se os conceitos considerados neste trabalho sobre os parâmetros:

- Custo: vinculado ao número de etapas.
- Tempo de execução: vinculado ao número de etapas.
- Desempenho: vinculado à forma de tratamento dos dados experimentais.
- Influência do operador: vinculado à forma de tratamento dos dados.

Conforme Quadro 1, a classificação qualitativa de cada parâmetro do procedimento de dosagem do CAA será avaliado.

Quadro 1 – Escala qualitativa de análise.

Escala	***Sigla***	***Característica***
NÃO SE APLICA	NA	Não existe
RUIM	R	Não está adequado
SATISFATÓRIO	S	Está razoável com ressalvas
ADEQUADO	A	Está adequado e suficiente

Fonte: Autoria própria (2021).

ISBN: 978-65-89908-00-5

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Gomes e Barros (2009) afirmam que os métodos tradicionais fundamentam-se em conceitos empíricos, por isso requererem ensaios em muitas etapas e, com isso, demandam uma grande quantidade de materiais e tempo que vão de encontro à boa relação custo/benefício.

Nan Su *et al.* (2001) sugere que a mistura de CAA é composta por duas fases: o agregado graúdo e a argamassa além de limitar a quantidade de agregados com a relação volumétrica entre o agregado miúdo e o total de agregados entre 50% e 57%, para evitar bloqueios no adensamento. No entanto, designa uma etapa de estimativa da relação água/materiais finos e a inserção do superplastificante. Entretanto, não tem procedimento estatístico consistente que auxilie em novas modificações nos constituintes, sendo a interação dos materiais verificada por observação visual e ajustada por regressão linear.

O método de Gomes, Gettu e Agulló (2003), com a otimização separadamente das fases de composição da pasta, determina um procedimento de difícil execução. Já as metodologias Tutikian (2004) e Tutikian e Dal-Molin (2007) propõem o desenho de diagrama de dosagem correlacionando fatores básicos da composição. Embora caracterize uma análise simples para um concreto complexo de otimizar, como o CAA, e possua muitas etapas, principalmente dependente da influência do operador, a metodologia Tutikian (2004) foi adotada por Geyer (2005) e Silva (2008) antes do aperfeiçoamento em 2007 (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Os métodos analisados quanto ao número de etapas são classificados conforme a Quadro 2, variando de R para A, da maior para menor quantidade de etapas, respectivamente.

ISBN: 978-65-89908-00-5

Quadro 2 – Definição e classificação das etapas de dosagem de CAA.

Métodos de dosagem	Número de etapas	Classificação
Nan Su *et al*. (2001)	9	R
Gomes, Gettu e Agulló (2003)	7	S
Tutikian (2004)	9	R
Tutikian e Dal Molin (2007)	6	A
Método Estatístico	6	A

Fonte: Autoria própria (2021).

Com isso, observa-se que Tutikian e Dal Molin (2007) se assemelha ao método estatístico quanto ao número de etapas. Os métodos analisados quanto às técnicas estatísticas são classificados conforme a Quadro 3.

ISBN: 978-65-89908-00-5

Quadro 3 – Definição e classificação das técnicas estatísticas de dosagem de CAA.

Métodos de dosagem	Técnicas estatísticas	Classificação
Nan Su *et al.* (2001)	Regressão linear simples Regressão linear múltipla	R
Gomes, Gettu e Agulló (2003)	Regressão linear múltipla	R
Tutikian (2004)	Regressão linear múltipla Diagrama de correlação entre os constituintes	S
Tutikian e Dal Molin (2007)	Regressão linear múltipla Diagrama de correlação entre os constituintes e ajuste do custo	S
Método Estatístico	Regressão linear múltipla Regressão polinomial de Scheffé Análise de variância	A

Fonte: Autoria própria (2021).

Constata-se que os métodos de dosagem, fundamentam-se em técnicas estatísticas do tipo regressão, seja linear (interação de uma variável/constituinte) ou múltipla (interação de duas ou mais variáveis/constituintes). É possível inferir ainda que dentre os métodos tradicionais, Tutikian (2004) e Tutikian-Dal Molin (2007) apresentam melhor tratamento de dados experimentais, devido aos diagramas de correlação entre constituintes e desempenho, que existe também no método estatístico, inferindo-se relação inversa com o parâmetro influência do operador.

Conforme o Quadro 4, infere-se que os métodos de Nan Su e*t al.* (2001) e Tutikian (2004) tendem a apresentar maior tempo e custo. Enquanto os métodos Gomes, Gettu e

ISBN: 978-65-89908-00-5

Agulló (2003), Tutikian-Dal Molin (2007) e o método estatístico sugerem que o tempo e custo de produção será otimizado, devido ao menor número de etapas.

Quadro 4 – Avaliação qualitativa dos parâmetros relacionados à dosagem de CAA.

Métodos de dosagem	Tempo de execução	Custo	Influência do operador	Desempenho
Nan Su *et al.* (2001)	R	R	R	S
Gomes, Gettu e Agulló (2003)	S	S	R	S
Tutikian (2004)	R	R	S	S
Tutikian e Dal Molin (2007)	A	A	S	A
Método Estatístico	A	A	A	A

Fonte: Autoria própria (2021).

O Quadro 4 sugere que o método estatístico de mistura se destaca entre os demais quanto aos parâmetros avaliados. Tendo uma avaliação mais favorável quanto ao grau de tratamento dos dados e modelagem, pois complementa os diagramas de correlação com adicionais testes de ajuste, já previsto no procedimento, o que não ocorre para a proposta de Tutikian e Dal Molin (2007).

Mesmo com maior necessidade de repetições e observação do operador por alguns métodos, todos podem ser adotados para produção de CAA com bom desempenho, variando o grau de dificuldade e precisão da produção. O que não é possível afirmar para o parâmetro influência do operador, que tem maior dependência da consistência da análise estatística, e a isso tende a definir o grau de precisão e relação custo/benefício, como é relatado por Paese (1997), Dias *et al.* (2010), Dias *et al.* (2019).

ISBN: 978-65-89908-00-5

8. CONCLUSÃO

Apesar da complexidade da mistura do CAA, busca-se o aprimoramento e evolução da técnica de produção com crescente custo-benefício.

Com isso, nesse trabalho infere-se, a partir de análise comparativa entre os fundamentos teóricos e etapas dos métodos selecionados e o método estatístico, que a dosagem estatística consistente tende a contribuir com a precisão, assertividade e eficiência, benefícios potencializados com uso de *softwares*.

Com base na literatura, o método estatístico, que já é adotado em outras indústrias para produção de misturas, tem potencial de aplicação na indústria da construção e de promover controle de qualidade, contribuindo com redução da quantidade de experimentos e otimização dos recursos e energia.

9. REFERÊNCIAS

DIAS, C. M. R. *et al.* Mixture screening design to choose formulations for functionally graded fiber cements. *Materials Science Forum*. Vols. 631-632 (2010) pp. 65-70.

DIAS, C. M. R. *et al.* Dosagem de Argamassas pelo Delineamento Estatístico de Misturas e otimização Múltipla: Argamassa Estabilizada. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Goiânia, 2019.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais. In: **V simpósio epusp sobre estruturas de concreto**. São Paulo, 2003.

NAN SU; HSU, K. C.; CHAI, H. W. A simple mix design method for selfcompacting concrete. In: **Cement and Concrete Research.** 2001.

PAESE, C. **Experimentos com Misturas: do Planejamento à análise.** Instituto de Matemática. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. (Dissertação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. (Tese) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável.** São Paulo: Pini, 2008.