SEMANA ACADÊMICA
REVISTA CIENTÍFICA
ISSN 2236-6717

DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM OTIMIZAÇÃO DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM PLANILHA ELETRÔNICA INTEGRADA

Durval Bertoldo Menezes[1]
https://orcid.org/0000-0002-0972-8554
Vanessa Cristina de Castilho[2]
https://orcid.org/0009-0003-3637-8355
Pablo Augusto Krahl[3]
https://orcid.org/0000-0002-6172-5481
Maria Cristina Vidigal de Lima[4]
https://orcid.org/0000-0001-9641-474X

RESUMO

Introdução: O concreto autoadensável caracteriza-se pela capacidade de escoar, preencher as fôrmas e passar entre as armaduras sob a ação do próprio peso, sem necessidade de vibração mecânica. Entretanto, sua dosagem é mais complexa que a do concreto convencional, pois a elevada fluidez deve ser alcançada sem comprometer a coesão, a estabilidade e a resistência à segregação. Os modelos de empacotamento de partículas podem auxiliar na definição das proporções dos materiais, embora sua aplicação geralmente envolva diversos cálculos e ferramentas auxiliares.

Objetivo: Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar experimentalmente uma planilha integrada no Microsoft Excel para a dosagem de concreto autoadensável. A planilha foi concebida para concentrar, em um único ambiente computacional, os dados de caracterização dos materiais, os cálculos de empacotamento, a otimização das frações volumétricas e a determinação das quantidades dos constituintes. A ferramenta proposta também apresenta finalidade educacional para estudantes de graduação e pós-graduação.

Metodologia: Foram utilizadas cimento Portland CP V-ARI, sílica ativa, areia fina, areia média, brita zero, aditivo superplastificante e água. As distribuições granulométricas e as massas específicas dos materiais foram inseridas na planilha. Aplicou-se o modelo modificado de Andreasen e Andersen, com coeficiente de distribuição igual a 0,23, e utilizou-se a ferramenta Solver do Excel para minimizar, pelo método dos mínimos quadrados, a diferença entre as curvas granulométricas teórica e calculada. Foi produzida uma batelada experimental de 15 L. O desempenho no estado fresco foi avaliado pelo ensaio de espalhamento e pelo tempo T500, e seis corpos de prova cilíndricos de 100 mm × 200 mm foram moldados, curados em água e ensaiados à compressão aos 28 dias.

Submetido em: 02/07/2026 – **Aprovado em**: 10/07/2026 – **Publicado em**: 10/07/2026

1 Docente/Doutor, Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Uberlândia, Minas Gerais, durval@iftm.edu.br.
2 Docente/Doutora, Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, vanessa.castilho@ufu.br.
3 Docente/Doutor, Universidade Presbiteriana Mackenzie – Campinas, São Paulo, pablo.krahl@mackenzie.br.
4 Docente/Doutora, Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, macris@ufu.br.

http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-272-13335
FORTALEZA-CE. EDIÇÃO 272. V.14. ANO 2026.

Resultados: A planilha integrou satisfatoriamente a otimização granulométrica, o cálculo das frações volumétricas e a determinação das quantidades dos materiais. A distribuição granulométrica calculada apresentou boa aproximação em relação à curva teórica, embora tenha sido observada uma descontinuidade entre as frações de areia média e brita zero. Durante a produção, a relação água/cimento foi ajustada de 0,31 para 0,37 para obtenção da mobilidade necessária. O concreto apresentou espalhamento médio de 610 mm e tempo T500 de 3,41 s, correspondentes às classes SF1 e VS2, sem sinais visuais marcantes de segregação ou exsudação. A resistência média à compressão aos 28 dias foi de 56,35 MPa, com desvio-padrão de 2,56 MPa, permitindo seu enquadramento na classe C55.
Conclusão: A planilha proposta auxiliou satisfatoriamente a dosagem do CAA ao integrar os principais cálculos em uma ferramenta única, acessível e reprodutível. A mistura produzida apresentou estabilidade adequada no estado fresco e elevada resistência à compressão, embora a verificação experimental e os ajustes práticos tenham permanecido indispensáveis.

Palavras-chave
Concreto autoadensável; empacotamento de partículas; dosagem de concreto; planilha eletrônica; resistência à compressão.

Self-compacting concrete mix design with particle-packing optimization using an integrated electronic spreadsheet

ABSTRACT

Introduction: Self-compacting concrete is characterized by its ability to flow, fill formwork, and pass-through reinforcement under its own weight, without mechanical vibration. However, its mix design is more complex than that of conventional concrete because high flowability must be achieved without compromising cohesion, stability, and segregation resistance. Particle-packing models can support the selection of material proportions, although their application commonly requires several calculations and auxiliary tools.

Objective: This study aimed to develop and experimentally evaluate an integrated Microsoft Excel spreadsheet for self-compacting concrete mix design. The spreadsheet was designed to concentrate material characterization data, particle-packing calculations, volumetric fraction optimization, and the determination of constituent quantities in a single computational environment. The proposed tool also has an educational purpose for undergraduate and graduate students.

Methodology: The materials comprised CP V-ARI Portland cement, silica fume, fine sand, medium sand, crushed stone, a superplasticizer, and water. Particle-size distributions and specific gravities were entered into the spreadsheet. The modified Andreasen and Andersen model was applied with a distribution coefficient of 0.23, and the Excel Solver tool was used to minimize the difference between the theoretical and calculated particle-size distribution curves by the least-squares method. A 15 L experimental batch was produced. Fresh-state performance was assessed through the slump-flow test and T500 time, and six cylindrical specimens measuring 100 mm × 200 mm were molded, water-cured, and tested for compressive strength at 28 days.

Results: The spreadsheet successfully integrated the granulometric optimization, volumetric fraction calculation, and determination of material quantities. The calculated particle-size distribution showed good agreement with the theoretical curve, although a discontinuity was observed between the medium sand and crushed-stone fractions. During production, the water-to-cement ratio was adjusted from 0.31 to 0.37 to obtain the required mobility. The concrete achieved an average slump flow of 610 mm and a T500 time of 3.41 s, corresponding to classes SF1 and VS2. No marked visual signs of segregation or bleeding were observed. The average 28-day compressive strength was 56.35 MPa, with a standard deviation of 2.56 MPa, allowing classification as C55 concrete.

Conclusion: The proposed spreadsheet satisfactorily supported self-compacting concrete mix design by integrating the main calculations into a single, accessible, and reproducible tool. The experimentally produced mixture presented adequate fresh-state stability and high compressive strength, although laboratory verification and practical adjustments remained essential.

Keywords

Self-compacting concrete; particle packing; concrete mix design; electronic spreadsheet; compressive strength.

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) foi desenvolvido no Japão no final da década de 1980, inicialmente como uma alternativa para melhorar a qualidade das estruturas diante das dificuldades relacionadas ao adensamento do concreto. Desde então, sua utilização tem se ampliado na construção civil, em razão da capacidade de preencher as fôrmas exclusivamente pela ação do próprio peso e assim envolver as armaduras, dispensando o emprego de vibração mecânica (OKAMURA; OUCHI, 2003; SHI et al. 2015; DEY et al., 2021).

Para ser classificado como autoadensável, o concreto deve reunir, simultaneamente, capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; NEVILLE, 2016; SHI et al., 2015; DEY et al., 2021). Essas características favorecem a concretagem de elementos com geometrias complexas, elevada densidade de armaduras ou em locais de difícil acesso, sendo sua aplicação particularmente vantajosa na produção de elementos pré-moldados, nos quais a rapidez de execução, acabamento superficial, reprodutibilidade e o controle da qualidade são fundamentais (DEY et al., 2021).

Em relação ao concreto convencional, a dosagem do CAA, apresenta maior complexibilidade, uma vez que a mistura deve apresentar elevada fluidez sem perder coesão e estabilidade (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SHI et al., 2015; DEY et al., 2021). Portanto, um equilíbrio adequado entre água, cimento, adições minerais, agregados e aditivos químicos é extremamente necessário, pois pequenas alterações nas proporções ou nas características desses materiais podem modificar significativamente o comportamento do concreto no estado fresco (NEVILLE, 2016; TUTIKIAN; HELENE, 2011; SHI et al., 2015; DEY et al., 2021).

Nesse contexto, as propriedades físicas e a granulometria dos materiais constituintes exercem papel fundamental na definição do traço, uma vez que a distribuição das partículas influencia o volume de vazios e a dinâmica interna da mistura no estado fresco (SHI et al., 2015; FUNK; DINGER, 1994; DOS SANTOS et al., 2021; DEY et al., 2021). Nesse quesito, os aditivos superplastificantes proporcionam maior fluidez sem o aumento excessivo da quantidade de água (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2008; DEY et al., 2021), enquanto materiais finos, como a sílica ativa, podem contribuir para a coesão, a estabilidade e o desempenho mecânico do concreto (TUTIKIAN; HELENE, 2011; GOES et al., 2020; DEY et al., 2021).

Para atingir essas características, utiliza-se modelos de empacotamento de partículas, uma das ferramentas mais importantes para auxiliar a dosagem de CAA, destacando-se o modelo de Andreasen e Andersen, proposto em 1930, que relaciona a distribuição das partículas aos seus diâmetros, permitindo determinar a combinação das diferentes frações granulométricas, buscando uma composição mais adequada. (FUNK; DINGER, 1994; GOES et al., 2020; DOS SANTOS et al., 2021).

Por outro lado, a adoção de um método de dosagem eficiente também apresenta implicações econômicas, embora um CAA possa demandar maiores quantidades de materiais finos e aditivos, a utilização do método pode reduzir a necessidade de equipamentos de vibração, tempo de concretagem e reparos decorrentes de falhas de adensamento, impactando diretamente na redução da mão de obra de execução. Além disso, a otimização das proporções dos materiais contribui para evitar consumos excessivos e reduzir os impactos ambientais associados à produção do concreto, especialmente aqueles relacionados ao consumo de cimento (GOES et al., 2020; DOS SANTOS et al., 2021; DEY et al., 2021).

Apesar da existência de diferentes métodos de dosagem, sua aplicação, frequentemente envolve cálculos distribuídos em diversas planilhas, tabelas ou programas, dificultando a visualização integrada do processo. Assim, a concentração dos dados e das etapas de cálculo em uma única planilha eletrônica, pode tornar o procedimento mais organizado, acessível e reprodutível, facilitando a realização de ajustes imediatos e a melhor compreensão da influência de cada material sobre o traço final.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia para a dosagem de CAA por meio de uma única planilha eletrônica do Microsoft Excel, em conjunto com o suplemento solver, concentrando todos os dados relativos aos materiais, cálculos de empacotamento, definição das frações volumétricas e por fim, o traço do concreto. Também apresenta caráter educacional, buscando oferecer a estudantes de graduação e pós-graduação uma ferramenta que facilite a compreensão integrada dos princípios envolvidos na dosagem do CAA. A planilha será disponibilizada gratuitamente para download e livre acesso, permitindo sua utilização, reprodução e adaptação por estudantes, docentes e profissionais da área.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Concreto autoadensável é um material de alta fluidez que preenche as formas, fluindo pelas armaduras puramente sob a ação da gravidade (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014; DEY et al., 2021), dispensando a necessidade de vibração mecânica durante a etapa de lançamento. Sua composição equilibrada garante excelente coesão, evitando a segregação dos agregados e o acúmulo de água na superfície. O resultado final é uma estrutura homogênea, com excelente acabamento superficial e redução de patologias como nichos de concretagem (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; DEY et al., 2021).

A dosagem de um CAA constitui uma das etapas mais críticas de seu desenvolvimento, uma vez que esse material deve apresentar, simultaneamente, todas as características já descritas (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; NEVILLE, 2016), as quais são interdependentes e estão diretamente relacionadas ao equilíbrio entre os materiais.

Alterações relativamente pequenas na relação água/cimento, granulometria dos materiais, teor de finos ou na dosagem do aditivo superplastificante, podem provocar mudanças significativas no comportamento reológico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; TUTIKIAN; HELENE, 2011; SHI et al., 2015; DEY et al., 2021).

Portanto, a definição do traço de um CAA envolve a determinação das proporções volumétricas de cada material, de forma que a mistura apresente, simultaneamente, as características necessárias para um bom desempenho mecânico (DEY et al., 2021).

A metodologia do empacotamento de partículas, combina partículas de diferentes dimensões de modo que as partículas menores ocupem os espaços existentes entre as maiores, o que é possível, somente com a adequada distribuição granulométrica dos componentes, resultando diretamente, como benefício, na diminuição de vazios (FUNK; DINGER, 1994; GOES et al., 2020).

O modelo desenvolvido por Andreasen e Andersen, é uma das referências utilizadas para se obter distribuições granulométricas adequadas para a composição de concretos, inclusive, os de alto desempenho e os CAA. Contudo, a formulação original considera, teoricamente, a presença de partículas com dimensões infinitamente pequenas, o que praticamente é impossível de se obter (MARTOS, 2023).

Diante dessa limitação, Funk e Dinger propuseram uma adaptação ao modelo, incorporando à formulação um diâmetro mínimo real para as partículas. Essa modificação possibilitou um emprego prático mais compatível, dando origem a uma função matemática destinada a descrever a distribuição granulométrica considerada ideal (Funk; Dinger, 1994; Dos Santos et al., 2021; SHI et al., 2015), expressa pela **Equação 1**.

$$P_{(D)ideal} = 100\frac{\left(D^q - D_{min}^q\right)}{\left(D_{max}^q - D_{min}^q\right)} \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde, $P_{(D)ideal}$ representa a fração passante acumulada de partículas com diâmetro menor ou igual a D, sendo, D_{min} e D_{max}, respectivamente, o menor e maior diâmetro da amostra de partículas de cimento, sílica ativa, areia média, areia fina e brita zero. O expoente de distribuição q, é um parâmetro fundamental que controla a proporção relativa entre partículas finas e grossas.

No emprego prático do modelo, busca-se aproximar a distribuição granulométrica obtida pela combinação dos agregados e das adições minerais com a distribuição teórica estabelecida pela **Equação 1**. Dessa forma, as proporções dos diferentes materiais são ajustadas até que a curva da mistura apresente a maior sobreposição com a curva ideal, definida pelo modelo (MARTOS, 2023).

Além de favorecer as propriedades reológicas do concreto, o empacotamento de partículas pode proporcionar benefícios econômicos e ambientais, uma vez que a distribuição granulométrica mais eficiente, reduz o volume de vazios entre os grãos e pode diminuir a quantidade de cimento necessária para atender aos requisitos de desempenho (GOES et al., 2020; DOS SANTOS et al., 2021). Consequentemente, há possibilidade de redução dos custos de produção e das emissões de dióxido de carbono associadas à fabricação do clínquer. O método também permite o aproveitamento de materiais pozolânicos, adições minerais e subprodutos industriais, como cinzas volantes e fíler calcário, contribuindo para uma utilização mais sustentável dos recursos na construção civil (GOES et al., 2020).

Apesar dessas vantagens, a aplicação do modelo modificado de Andreasen e Andersen, na dosagem do concreto autoadensável, requer controle experimental rigoroso dos materiais utilizados, pois a qualidade dos resultados depende da caracterização granulométrica precisa de todos os componentes (DEY et al., 2021).

Para determinar as proporções dos materiais e conseguir o melhor ajuste entre a curva granulométrica da mistura ($P_{mistura}$) e a curva ideal (P_{ideal}), emprega-se o método dos mínimos quadrados, permitindo avaliar diferentes combinações de materiais e selecionar aquela que minimiza a soma dos quadrados dos desvios entre os valores calculados para a mistura e os valores previstos pelo modelo teórico (DOS SANTOS et al., 2021). Assim, o ajuste busca identificar a composição que apresenta a menor diferença global em relação à distribuição granulométrica considerada ideal. A curva dos materiais utilizados $P_{mistura}$ é dada pela **Equação 2**.

$$P_{mistura} = PCM.VCM + PSA.VSA + PAF.VAF + PAM.VAM + PBZ.VBZ \qquad \text{Eq. 2}$$

Em que *PCM, PSA, PAF, PAM* e *PBZ* são as frações volumétricas do cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e brita zero, respectivamente, *VCM*, *VAS*, *VAF*, *VAM* e *VBZ* são os volumes de cimento, areia fina, areia média e brita zero, respectivamente.

Portanto, o ajuste da curva é realizado alterando os valores das frações volumétricas *PCM*, *PAS*, *PAF*, *PAM* e *PBZ* até que se obtenha o melhor ajuste aos dados teóricos, ou seja $P_{mistura} \rightarrow P_{ideal}$.

As frações volumétricas dos materiais utilizados na produção do concreto são dadas pelas **equações 3** a **7**:

$$PCM = \frac{VCM}{V_{secos}} \qquad \text{Eq. 3}$$

$$PSA = \frac{VSA}{V_{secos}} \qquad \text{Eq. 4}$$

$$PAF = \frac{VAF}{V_{secos}} \qquad \text{Eq. 5}$$

$$PAM = \frac{VAM}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$PBZ = \frac{VBZ}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde, V_{secos} é o volume total de materiais secos adicionados à mistura. Com a determinação dos valores das frações volumétrica dos materiais, é possível determinar as dosagens de cada material. Para tal, o teor água aglomerante (TAAGL) é definido e dado pela **Equação 8.**

$$TAAGL = \frac{d_A V_A + 0{,}56 d_{sp} V_{sp}}{d_{CM} VCM + d_{SA} VSA} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde, d_A, d_{sp}, d_{CM} e d_{SA} são as massas específicas da água, superplastificante, cimento e sílica ativa. V_A, e V_{sp} são os volumes de água e superplastificante, respectivamente. O coeficiente 0,56, corresponde à fração de água presente no superplastificante. O teor de água finos (*TAF*) é definido e dado pela **Equação 9**.

$$TAF = \frac{V_A + 0{,}56 V_{SP}}{VCM + VSA} \quad \text{Eq. 9}$$

Volume de secos é dado conforme a **Equação 10**:

$$V_{secos} = VCM + VSA + VAF + VAM + VBZ \quad \text{Eq. 10}$$

Fração areia argamassa (PAAG) é dado pela **Equação 11**.

$$PAAG = \frac{VAF + VAM}{VARG} \quad \text{Eq. 11}$$

E o volume de argamassa, dado por: $V_{ARG} = VCM + VSA + VAF + VAM + V_A + V_{AR}$.

O teor água finos (*PAF*) é definido e dado pela **Equação 12**.

$$PAF = \frac{V_A + 0{,}56 V_{sp}}{VCM + VSA} \quad \text{Eq. 12}$$

E por fim, o volume total do concreto V_T é dado pela **Equação 13**.

$$V_T = V_{AR} + V_A + V_{sp} + V_{secos} \quad \text{Eq. 13}$$

Os volumes correspondentes a cada constituinte do CAA serão obtidos por meio da manipulação algébrica das equações apresentadas anteriormente.

Então, substituindo as **Equações 3** e **4** na **Equação 8**, resultará na **Equação 14**.

$$TAAGL = \frac{d_A V_A + 0{,}56 d_{sp} V_{sp}}{d_{CM} PCM . V_{secos} + d_{SA} PSA . V_{secos}} \quad \text{Eq. 14}$$

Na **Equação 14**, isola-se o volume de água, resultando na **Equação 15**.

$$V_A = V_{secos} \left(\frac{TAAGL . d_{CM} . PCM}{d_A} + \frac{TAAGL . d_{SA} . PSA}{d_A} \right) - \frac{0{,}56 d_{SP} . V_{SP}}{d_A} \quad \text{Eq. 15}$$

O primeiro e o segundo termos, do lado direito, da **Equação 15**, serão denominados A e B, respectivamente, para facilitar a notação matemática.

$$A = V_{secos} \left(\frac{TAAGL . d_{CM} . PCM}{d_A} + \frac{TAAGL . d_{SA} . PSA}{d_A} \right) \quad \text{Eq. 16}$$

$$B = \frac{0{,}56 d_{SP} . V_{SP}}{d_A} \quad \text{Eq. 17}$$

Então, a **Equação 15** pode ser reescrita conforme **Equação 18**.

$$V_A = A . V_{secos} - B \quad \text{Eq. 18}$$

Sendo o volume total $V_T = 1$, na **Equação 13**, resultará na **Equação 19**.

$$V_A = 1 - V_{AR} - V_{sp} - V_{secos} \quad \text{Eq. 19}$$

Da **Equação 19,** também pode-se denominar os termos C e D:

$$C = 1 - V_{AR} \quad \text{Eq. 20}$$

$$D = V_{sp} \quad \text{Eq. 21}$$

Portanto, a **Equação 19** pode ser escrita como:

$$V_A = C - D - V_{secos} \quad \text{Eq. 22}$$

A substituição da **Equação 18** na **Equação 22,** resulta na **Equação 23.**

$$V_{secos} = \frac{C - D + B}{A + 1} \qquad \text{Eq. 23}$$

O que permite calcular o volume de secos. Pela substituição da **Equação 23** na **Equação 22**, resulta na **Equação 24**.

$$V_A = C - D - \left(\frac{C - D + B}{A + 1}\right) \qquad \text{Eq. 24}$$

Os termos A, B, C e D foram empregados para condensar a notação algébrica. Assim, a partir da inserção dos parâmetros previamente conhecidos do ajuste da curva, da determinação das respectivas frações volumétricas, é possível calcular os volumes de água e de materiais secos da mistura. Esses resultados servem de base para a obtenção dos volumes individuais dos demais constituintes do CAA, conforme **Equações 3** a **7**.

Sendo todo o procedimento de cálculo, realizado de forma integrada em uma única planilha no Microsoft Excel, sem a necessidade de outros *softwares* ou planilhas paralelas. Para sua perfeita utilização, devem ser informadas as massas específicas dos materiais, os parâmetros adotados no dimensionamento, incluindo valores predefinidos e restrições de cálculo e os dados granulométricos do cimento, sílica ativa, areia média e fina e brita zero.

De acordo com as diretrizes da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), o comportamento reológico do CAA no estado fresco pode ser mapeado combinando-se a capacidade de preenchimento livre (classes SF) e a taxa de deformação inicial através do tempo T500 (classes VS). Enquanto o diâmetro final de espalhamento quantifica a capacidade de escoamento horizontal, o parâmetro T500 qualifica a velocidade relativa desse fluxo, correlacionando-se diretamente com a viscosidade plástica da matriz cimentícia. A classe SF1 caracteriza concreto com espalhamento entre 550 mm e 650 mm, sendo indicada para estruturas com baixa densidade de armaduras e peças horizontais. A classe SF2 abrange a faixa de 660 mm a 750 mm, representando a categoria de uso mais amplo em elementos estruturais convencionais. Por fim, a classe SF3 engloba os concretos com espalhamento de 760 mm a 850 mm, recomendada para estruturas com geometrias complexas ou densamente armadas.

Em relação à viscosidade plástica aparente, avaliada pelo ensaio T500, a norma estabelece duas classes principais de acordo com o tempo decorrido para o concreto atingir o diâmetro de 500 mm. A classe VS1 classifica os concretos com tempo T500 menor ou igual a 2 segundos, caracterizando misturas de menor viscosidade e escoamento rápido. Já a classe VS2 identifica os concretos com tempo T500 superior a 2 segundos, indicando misturas mais viscosas e coesas, com maior estabilidade frente à segregação dos agregados.

Portanto, a obtenção de um traço que atenda simultaneamente aos requisitos de desempenho no estado fresco e às propriedades mecânicas no estado endurecido depende, inicialmente, da otimização do empacotamento das partículas. Nesse contexto, o estudo do empacotamento de partículas constitui uma das etapas mais importantes da dosagem do CAA, servindo de base para a definição das proporções entre os materiais constituintes.

3 METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, experimental, quantitativa, tecnológica e de caráter educacional, tendo como objetivo desenvolver e avaliar uma planilha eletrônica integrada para a dosagem de CAA. O estudo foi realizado na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, utilizando o Microsoft Office Home and Student 2019.

Os materiais usados para dosagem do concreto foram, cimento Portland CP V-ARI, sílica ativa, areia fina, areia média, brita zero, superplastificante e água. As características físicas do cimento, sílica ativa e do superplastificante foram obtidos junto aos fabricantes, enquanto os agregados foram caracterizados experimentalmente com relação as suas massas específicas e as granulometrias foram obtidas por medidas utilizando a técnica de difração a laser, que determina a distribuição granulométrica dos materiais de forma muito precisa.

A composição granulométrica ideal foi determinada pelo modelo modificado de Andreasen e Andersen, adotando-se q = 0,23 (FUNK; DINGER, 1994; DOS SANTOS et al., 2021). O ajuste da curva granulométrica da mistura à curva teórica foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, por meio da ferramenta Solver do Microsoft Excel. As variáveis de decisão foram as frações volumétricas do cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e da brita zero, respeitando-se os limites previamente definidos e a condição de que a soma das frações fosse igual a 1,00. Os ajustes das frações volumétricas pelo método dos mínimos quadrados seguem procedimentos semelhantes ao empregado na otimização numérica de curvas granulométricas descrita por trabalhos já realizados (Dos Santos et al.,2021). Após o ajuste, a planilha entrega os volumes e as massas dos constituintes do concreto.

Foi produzido um único traço, correspondente a aproximadamente 15 L, contendo 7,21 kg de cimento, 0,53 kg de sílica ativa, 1,40 kg de areia fina, 8,93 kg de areia média, 13,51 kg de brita zero, 0,16 kg de superplastificante e 2,24 kg de água.

O concreto foi preparado em betoneira de 150 L e a sequência de mistura compreendeu a adição da brita e das areias, seguida do cimento e da sílica ativa, sendo esses materiais homogeneizados a seco, sequencialmente adicionou-se a água e, posteriormente, o superplastificante. O tempo total de mistura foi de aproximadamente 7 minutos. Durante o processo, foram realizados dois acréscimos de água por vez, sendo 224,1 g em cada, totalizando 2,69 kg e resultando em relação água/cimento igual a 0,37.

A avaliação no estado fresco foi realizada pelo ensaio de espalhamento com o cone de Abrams (*flow test*), conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). Foram medidos dois diâmetros perpendiculares, resultando no espalhamento médio.

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 100 mm × 200 mm, submetidos à cura imersa em água saturada com cal hidratada, por 28 dias. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). O concreto foi produzido em 08 de maio de 2026 e ensaiado em 05 de junho de 2026.

A análise dos dados foi planejada para avaliar:

- a proximidade entre a curva granulométrica da mistura e a curva ideal do modelo modificado de Andreasen e Andersen;
- a redução da soma dos quadrados dos resíduos pelo Solver;
- o atendimento das frações volumétricas às restrições impostas;
- a obtenção das quantidades dos constituintes em uma única planilha;
- o espalhamento médio do concreto;
- a homogeneidade e a estabilidade visual da mistura;
- a ausência de segregação e exsudação;
- a resistência média à compressão axial aos 28 dias;
- a aplicabilidade da planilha como ferramenta técnica e educacional.

A planilha será considerada funcional, caso seja capaz de realizar, de maneira integrada, o ajuste da curva granulométrica, a determinação das frações volumétricas e o cálculo das quantidades dos materiais, respeitando as restrições previamente estabelecidas.

A avaliação experimental buscará verificar se o traço calculado, resulta em uma mistura com características compatíveis com um CAA, especialmente em relação à capacidade de escoamento, à coesão e estabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As massas específicas dos agregados foram obtidas de acordo com as normativas NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e NBR NM 53 (ABNT, 2009b), para agregados miúdos e graúdos, respectivamente, enquanto as massas específicas do cimento e sílica ativa foram obtidas dos fabricantes. Os agregados exercem influência significativa sobre a trabalhabilidade, a compacidade, a estabilidade dimensional e a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Todas as características dos agregados e aglomerantes se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Detalhamento dos materiais utilizados na confecção do concreto

Detalhamento dos materiais			
Agregados	Massa Específica	Areia fina	2330,0 kg/m³
		Areia Média	2250,0 kg/m³
		Brita 0	2810,0 kg/m³
Cimento		Saco: 40 kg	CPV-ARI
		Marca:	Ciplan
		Tamanho de partículas principal	5-45 µm.
		Massa específica:	3000,0 kg/m³
Sílica Ativa		Marca	Silmix®
		Fabricante	Dow Corning
		Diâmetro médio das partículas	40 µm
		Massa específica	2220,0 kg/m³
		Área específica B.E.T	≥ 15.000 e ≤ 30.000 m²/kg
Superplastificante		Marca	MasterGlenium 5
		Fabricante	Sika
		Massa específica	1090,0 kg/m³

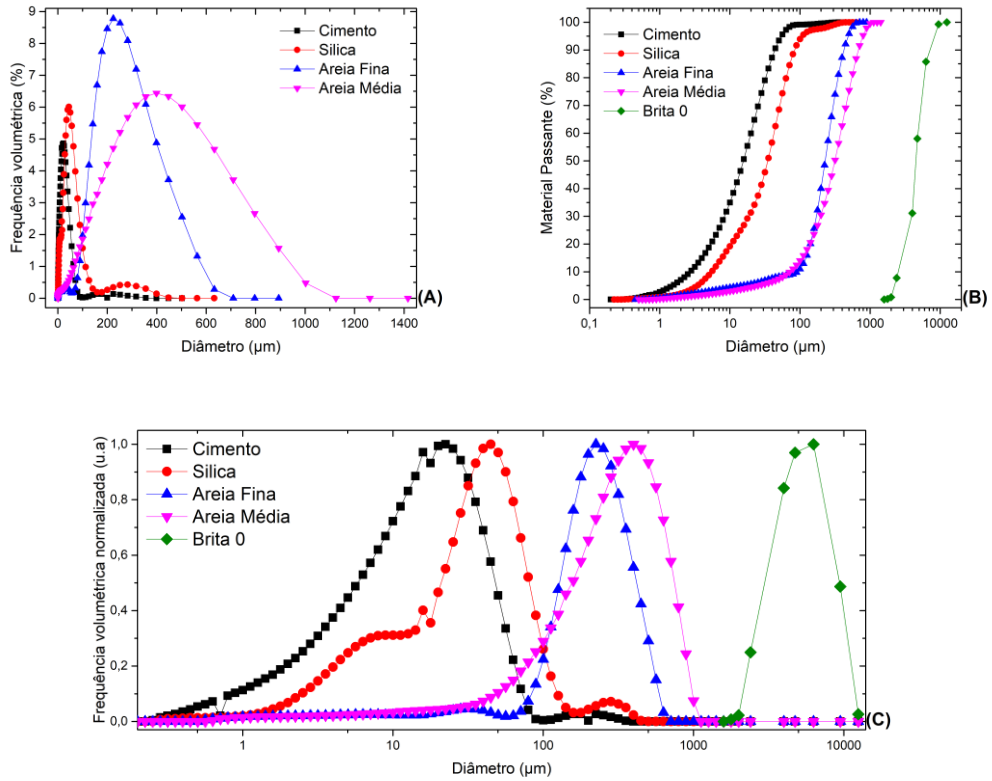
Fonte: os autores (2026)

A distribuição granulométrica da areia fina, areia média, cimento e sílica foram determinadas por meio do analisador de tamanho de partículas Mastersizer 2000, da Malvern Instruments, em cooperação com a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. O equipamento utiliza a técnica de difração a laser e permite analisar partículas dispersas em meio líquido, pós secos ou emulsões. O cimento e a sílica ativa foram dispersos em Álcool Isopropílico 99,8%, da Quimivida e as areias dispersas em água.

O princípio de funcionamento do analisador, baseia-se na incidência de um feixe de laser sobre as partículas em movimento na célula de análise, onde a radiação dispersa é captada por detectores posicionados em diferentes ângulos e processada pelo software do equipamento. A partir desses dados, a distribuição do tamanho das partículas é calculada com base nos modelos ópticos de Mie ou Fraunhofer, sendo os resultados expressos em termos de distribuição volumétrica e diâmetro equivalente de partículas esféricas. O Mastersizer 2000 apresenta faixa de medição aproximada entre 0,02 µm e 2.000 µm, além de proporcionar rapidez e elevada reprodutibilidade das análises.

A **Figura 1** apresenta as distribuições granulométricas dos materiais utilizados na composição do concreto. Na **Figura 1(A)**, observa-se a distribuição diferencial das partículas em escala linear, permitindo identificar as faixas de diâmetro predominantes. O cimento e a sílica concentram-se nas menores dimensões, enquanto as areias fina e média apresentam distribuições progressivamente deslocadas para maiores diâmetros. A areia fina possui maior concentração em torno de 250 µm, ao passo que a areia média apresenta pico próximo de 450 µm. A distribuição da sílica em diâmetros superiores aos esperados para suas partículas primárias, pode estar relacionada à presença de aglomerados de partículas durante as análises.

Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais constituintes do concreto: (a) distribuição diferencial em escala linear; (b) percentual acumulado passante em função do diâmetro das partículas; e (c) distribuição diferencial normalizada em escala logarítmica.



Fonte: os autores (2026)

A **Figura 1(B)** apresenta as curvas acumuladas de material passante em função do diâmetro, em escala logarítmica. Verifica-se uma sequência granulométrica formada pelo cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e brita zero. A sobreposição parcial entre as curvas das areias contribui para a continuidade granulométrica e para o preenchimento dos vazios existentes entre as partículas. A brita zero apresenta distribuição concentrada na faixa de alguns milímetros, com aproximadamente 50% de material passante próximo de 5.000 µm.

Na **Figura 1(C)**, as distribuições diferenciais normalizadas são apresentadas em escala logarítmica, facilitando a comparação entre os materiais. Os picos sucessivos evidenciam a presença de partículas em diferentes escalas de tamanho, condição importante para o empacotamento granulométrico. Apesar da separação observada entre a areia média e a brita zero, a combinação das diferentes frações permite ajustar a curva da mistura à distribuição teórica definida pelo modelo modificado de Andreasen e Andersen.

Após a caracterização física e granulométrica dos materiais, os resultados obtidos foram inseridos na planilha eletrônica para a dosagem do CAA.

Além dos dados da Tabela 1, foram inseridos os demais parâmetros de cálculo e as restrições adotadas para a determinação das frações volumétricas dos constituintes. Os dados de entrada e as restrições de cálculos são mostrados na **Tabela 2**.

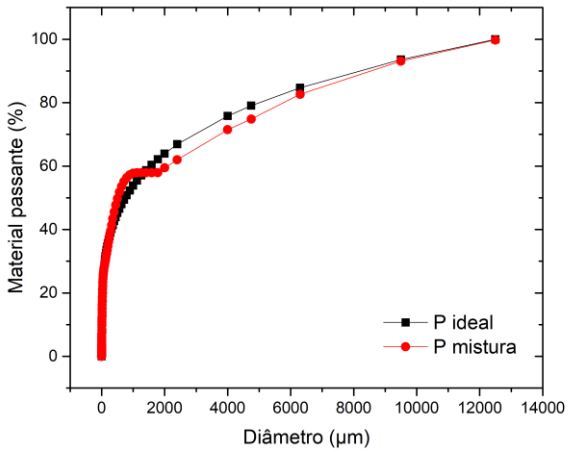
Tabela 2. Restrições de Cálculos – Valores máximos e mínimos das frações volumétricas dos materiais utilizados

Restrições de Cálculos – Valores máximos e mínimos das frações volumétricas dos materiais utilizados		
Frações	**Variações**	
Cimento	0,10	0,20
Sílica Ativa	0,01	0,02
Areia Fina	0,05	0,15
Areia Média	0,30	0,40
Brita Zero	0,35	0,40
Fração Areia/Argamassa (PAF)	0,40	0,50
Porcentagem de Plastificante	2,20	%
Massa Cimento	450,0	kg
Volume de ar	0,04	m^3
Teor Água/Aglomerante	0,30	

Fonte: os autores (2026)

A partir dos dados de entrada, a planilha calculou a distribuição granulométrica ideal pelo modelo modificado de Andreasen e Andersen, ajustando as frações volumétricas dos materiais, de modo a minimizar a diferença entre a curva granulométrica da mistura e a curva teórica de referência. A otimização foi calculada, no Microsoft Excel, por meio do Suplemento Solver, com função objetivo de minimização e método GRG Não Linear. As variáveis foram tratadas como não negativas, e aplicou-se uma tolerância de restrição muito baixa na ordem de 10^{-4}.

Figura 2. Comparação entre a distribuição granulométrica ideal e a distribuição granulométrica obtida para a mistura dos materiais.



Fonte: os autores (2026)

A comparação entre a curva granulométrica ideal, P_{ideal}, e a curva calculada da mistura, $P_{mistura}$, mostrada na **Figura 2**, evidencia boa aproximação entre as distribuições com $R^2 = 0{,}983$. As curvas apresentam elevada sobreposição nas regiões correspondentes às partículas finas e aos maiores diâmetros, indicando que as frações volumétricas determinadas pelo processo de otimização reproduziram satisfatoriamente o modelo teórico. A diferença observada entre as curvas P_{ideal} e $P_{mistura}$, especialmente na faixa compreendida entre aproximadamente 1.500 µm e 5.000 µm, pode ser atribuída à distribuição granulométrica dos materiais disponíveis. A areia média apresenta redução acentuada de sua contribuição a partir de cerca de 1.000 µm, enquanto a brita zero passa a apresentar participação mais expressiva apenas em diâmetros superiores. Dessa forma, verifica-se uma menor disponibilidade de partículas na região de transição entre o agregado miúdo e o agregado graúdo.

Essa descontinuidade granulométrica limita a capacidade da mistura de reproduzir integralmente a curva teórica definida pelo modelo modificado de Andreasen e Andersen. Além disso, as restrições estabelecidas para as frações volumétricas dos materiais reduzem a liberdade de ajuste do Solver.

Com a obtenção do melhor ajuste granulométrico a planilha entrega também as frações volumétricas dos constituintes do concreto, e consequentemente os volumes e as massas dos componentes do concreto, permitindo determinar o traço final empregado, conforme mostrado na **Tabela 3.**

Tabela 3. Frações volumétricas e consumo dos materiais do traço de concreto autoadensável por m^3 calculado pela planilha.

FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS		**(%)**
Cimento	0,200	20,00
Sílica Ativa	0,020	2,00
Areia Fina	0,050	5,00
Areia Média	0,330	33,00
Brita Zero	0,400	40,00
Somatório	**1,000**	**100%**
MASSAS/m³		
Água	149,40	kg/m³
Cimento	480,91	kg/m³
Sílica Ativa	35,59	kg/m³
Areia Fina	93,38	kg/m³
Areia Média	595,12	kg/m³
Brita Zero	900,90	kg/m³
Super Plastificante	10,58	kg/m³
A/C	0,31	kg/kg

Fonte: os autores (2026)

A composição resultante apresentou 20% de cimento, 2% de sílica ativa, 5% de areia fina, 33% de areia média e 40% de brita zero, totalizando 100% do volume de sólidos. A maior participação dos agregados miúdo e graúdo contribui para a formação do esqueleto granular, enquanto o cimento e a sílica ativa atuam como materiais finos no preenchimento dos vazios existentes entre as partículas.

Com base na dosagem definida pela planilha eletrônica, foi preparada uma batelada de concreto com volume de 15 L. A **Tabela 4** apresenta as quantidades dos materiais utilizadas na produção.

Tabela 4. Quantidades dos materiais utilizadas na produção de 15 L de concreto e ajustes da relação água/cimento.

Volume	**15,0**	**L**
Quantidades para o volume desejado		Unidades
Água	2,24	kg
Cimento	7,21	kg
Sílica Ativa	0,53	kg
Areia Fina	1,40	kg
Areia Média	8,93	kg
Brita Zero	13,51	kg
Super Plastificante	0,16	kg
A/C - 1	0,31	kg/kg

Fonte: os autores (2026)

Inicialmente, foram utilizados 2,24 kg de água, correspondentes à relação água/cimento de 0,31. Durante a mistura, verificou-se que a consistência obtida não proporcionava a mobilidade necessária, sendo realizados ajustes no teor de água.

Na primeira correção, acrescentou-se uma quantidade equivalente a 10% da água inicialmente prevista, elevando o consumo para 2,47 kg e a relação água/cimento para 0,34. Como a mistura ainda apresentava baixa capacidade de escoamento, foi realizada uma segunda correção, totalizando um acréscimo de 20% em relação à quantidade inicial. Dessa forma, o consumo final de água foi de 2,69 kg, com relação água/cimento efetiva de 0,37 (SHI et al., 2015; DEY et al., 2021).

Após os ajustes, o concreto foi avaliado por meio do ensaio de espalhamento pelo cone de Abrams, conforme apresentado na **Figura 3**. **A Figura 3(A)** mostra o posicionamento do cone sobre a placa de ensaio, enquanto as **Figuras 3(B)** e **3(C)** apresentam a medição do espalhamento em duas direções ortogonais. Foram obtidos diâmetros de 600 mm e 620 mm, resultando em um espalhamento médio de 610 mm. A pequena diferença entre as medições indica que o escoamento ocorreu de maneira relativamente uniforme.

O tempo necessário para que o concreto atingisse o diâmetro de 500 mm (T500) foi de 3,41 s. Com base nesses resultados, a mistura foi enquadrada na classe SF1 quanto ao espalhamento e na classe VS2 quanto à viscosidade plástica aparente, caracterizando capacidade de escoamento moderada e velocidade de espalhamento relativamente baixa, segundo NBR 15823-2 (ABNT, 2017b).

O aspecto superficial da mistura após o ensaio é apresentado na **Figura 3(D)**. Observa-se uma superfície relativamente rugosa, com presença visível dos agregados graúdos, porém sem evidências visuais marcantes de exsudação ou segregação. A necessidade de água adicional pode estar associada ao elevado teor de materiais finos, especialmente cimento e sílica ativa, que aumentam a superfície específica total e, consequentemente, a demanda de água. Além disso, a elevada concentração de sólidos e as transições entre as diferentes faixas granulométricas, podem ter limitado a mobilidade, inicialmente estimada pelo modelo de empacotamento.

Figura 3. Execução do ensaio de espalhamento e aspecto visual do concreto no estado fresco: (A) cone de Abrams; (B) e (C) medição dos diâmetros ortogonais de espalhamento; e (D) detalhe da superfície da mistura após o ensaio.

(A) **(B)** **(C)** **(D)**

Fonte: os autores (2026)

Mesmo após o acréscimo de água, a avaliação visual mostrou distribuição aparentemente homogênea dos agregados graúdos, sem formação evidente de halo de pasta na periferia, exsudação significativa ou concentração acentuada de agregados no centro. Apesar da superfície relativamente rugosa e da presença visível do agregado graúdo, a mistura manteve-se coesa e sem indícios visuais marcantes de segregação.

Dessa forma, o acréscimo de água foi necessário para proporcionar maior mobilidade à mistura, enquanto a elevada concentração de sólidos e o ajuste granulométrico contribuíram para a manutenção de sua coesão e estabilidade.

A resistência à compressão axial foi determinada em corpos de prova cilíndricos de 100 mm × 200 mm, aos 28 dias de idade, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018), a moldagem e cura dos corpos de prova de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015a).

Os resultados do ensaio de compressão axial são apresentados na **Tabela 5**. Os corpos de prova apresentaram resistência média de 56,35 MPa, com valores variando entre 53,04 MPa e 59,81 MPa, desvio padrão de 2,56 MPa, indicando baixa dispersão dos resultados em consequência da boa uniformidade do concreto produzido.

Tabela 5. Dados dos ensaios de compressão axial dos corpos de prova confeccionados com o concreto autoadensável

Corpo de prova	D1	D2	D_M	h	h/D	$\sigma_{Máx}$	σ_M	S
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(MPa)	(MPa)	
CP1	99,35	99,90	99,63	199,00	2,00	53,04	56,35	2,56
CP2	99,50	100,70	100,10	199,70	2,00	57,72		
CP3	99,30	100,00	99,65	198,40	1,99	58,04		
CP4	98,95	99,65	99,30	199,85	2,01	54,87		
CP5	99,15	99,95	99,55	199,10	2,00	54,61		
CP6	100,20	100,30	100,25	199,55	1,99	59,81		

Fonte: os autores (2026)

De acordo com a classificação de resistência, NBR 8953 (ABNT, 2015b), o concreto obtido se enquadra no grupo II e na classe C55, pertencente ao grupo dos concretos de maior resistência mecânica, ou seja, um Concreto de Alta Resistência (CAR). Esse resultado demonstra que o traço desenvolvido foi capaz de produzir um CAA com elevado desempenho no estado endurecido.

A resistência média obtida indica que o aumento da relação água/cimento, necessário para atingir a trabalhabilidade desejada, não comprometeu significativamente o desempenho mecânico do concreto, comportamento que pode ser justificado pela adequada compacidade da mistura, ao teor de materiais finos e à presença da sílica ativa, que contribuíram para a formação de uma matriz cimentícia mais densa.

A baixa dispersão dos dados de resistências, observada entre os corpos de prova, também sugere que o concreto apresentou boa homogeneidade durante a moldagem. Esse resultado é compatível com o comportamento observado no estado fresco, em que o concreto apresentou espalhamento médio de 610 mm e tempo T500 de 3,41 s, evidenciando boa capacidade de escoamento associada à estabilidade da mistura. A ausência visual de segregação e exsudação sugere maior uniformidade na distribuição dos constituintes, condição que pode ter contribuído para a baixa dispersão dos resultados de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016; DEY et al., 2021).

De forma geral, os resultados confirmam que a metodologia de dosagem adotada, permitiu alcançar um equilíbrio entre as propriedades no estado fresco e o desempenho mecânico no estado endurecido, produzindo um CAA com boa fluidez, estabilidade e resistência à compressão e baixa dispersão dos dados de resistência.

6 CONCLUSÃO

A planilha eletrônica desenvolvida, permitiu integrar, em um único ambiente, os cálculos de empacotamento de partículas, a definição das frações volumétricas e a determinação das quantidades dos materiais constituintes do CAA, tornando assim, o processo de dosagem mais organizado, acessível e reprodutível, reduzindo a necessidade de cálculos distribuídos em diferentes meios, favorecendo a compreensão das etapas envolvidas na formulação do traço.

O traço obtido, como aplicação prática da metodologia, apresentou características compatíveis com um concreto autoadensável, apresentando espalhamento médio de 610 mm, tempo T500 de 3,41 s, ausência de sinais visuais de segregação ou exsudação e estabilidade adequada no estado fresco. Esses resultados permitem enquadrar o CAA nas classes SF1 e VS2, conforme discutido no texto. No estado endurecido, a resistência média à compressão axial aos 28 dias foi de 56,35 MPa, com desvio-padrão de 2,56 MPa, demonstrando baixa dispersão dos resultados e permitindo classificar o CAA produzido na classe C55.

Conclui-se, portanto, que a metodologia proposta, utilizando a planilha integrada para a determinação do traço do CAA, foi capaz de orientar satisfatoriamente a dosagem do CAA, conciliando desempenho no estado fresco e elevada resistência mecânica. Além disso, a planilha eletrônica apresenta potencial de aplicação educacional, por permitir a visualização integrada dos efeitos das propriedades dos materiais, das restrições adotadas e dos ajustes de dosagem sobre o traço final. Contudo, ressalta-se que a verificação experimental permanece indispensável, especialmente em função da sensibilidade do CAA às variações dos materiais e às condições práticas de produção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52: agregado miúdo — determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53: agregado graúdo — determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953: concreto para fins estruturais — classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1: concreto autoadensável — parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-2: concreto autoadensável — parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: concreto — ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

DEY, S.; KUMAR, V. V. P.; GOUD, K. R.; BASHA, S. K. J. State of art review on self compacting concrete using mineral admixtures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [S. l.], v. 6, n. 1, artigo 18, p. 1–23, 2021. DOI: 10.1007/s41024-021-00110-9.

DOS SANTOS, R. A.; MEIRA, G. R.; BEZERRA, W. V. D. C.; BRAGA, F. A. V.; PONTES, D. L. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, e13115, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210004.1315.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions**. 1. ed. New York: Springer, 1994. DOI: 10.1007/978-1-4615-3118-0.

GOES, C. M. W.; KRAHL, P. A.; ALMEIDA, L. C.; TRAUTWEIN, L. M. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 62., 2020, evento virtual. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2020. p. 1–16.

MARTOS, L. G. C. **Modelagem de empacotamento de partículas multifatorial utilizando redes neurais**. 2023. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Tokyo, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003. DOI: 10.3151/jact.1.5.

SHI, C.; WU, Z.; LV, K.; WU, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 84, p. 387–398, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 415–452.