



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



TAIARA APARECIDA ZAPARTE

**Aplicação dos métodos AHP e TOPSIS no estudo da
durabilidade do concreto auto-adensável com adição de
metacaulim e cinza de casca de arroz**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

PATO BRANCO

2018

TAIARA APARECIDA ZAPARTE

**Aplicação dos métodos AHP e TOPSIS no estudo da
durabilidade do concreto auto-adensável com adição de
metacaulim e cinza de casca de arroz**

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Especialista na Pós-
Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR – *Câmpus* Pato Branco.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Gonçalves
Trentin

PATO BRANCO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Aplicação dos métodos AHP e TOPSIS no estudo da durabilidade do concreto auto-adensável com adição de metacaulim e cinza de casca de arroz

Por

TAIARA APARECIDA ZAPARTE

Esta monografia foi apresentada às 19 h do dia **31 de outubro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista no Curso de Especialização em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **aprovado**.

Prof Dr. Marcelo Gonçalves Trentin
UTFPR – *Câmpus* Pato Branco
(orientador)

Prof Dr. Sergio Luiz Ribas Pessa
UTFPR – *Câmpus* Pato Branco

Prof Dr. José Donizetti de Lima
UTFPR – *Câmpus* Pato Branco

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de cursar essa especialização em sua totalidade.

Ao orientador, Marcelo Trentin, e ao professor Dalmarino Setti, os quais contribuíram de forma significativa para que esse trabalho se concretizasse, ajudando na organização das ideias, bem como no conhecimento e incentivo transmitido.

Também, à todos os professores do curso de Especialização em Engenharia de Produção, professores da UTFPR, *Campus* Pato Branco, pela contribuição no desenvolvimento do trabalho e orientação técnica.

À minha família, por sempre acreditarem e mim e me apoiarem. Um carinho todo especial à minha mãe, pois sem ela nada seria possível, e meu parceiro de vida, Cleito José Trembulak, pela paciência, incentivo e as palavras de conforto.

À todos os colegas e amigos que fiz no decorrer desta caminhada, pela troca de conhecimento, convívio e amizade.

Enfim, sou grata a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desta monografia.

“Se você continuar a fazer o que sempre fez, continuará a
conseguir o que sempre conseguiu”.

(ANTHONY ROBBINS)

RESUMO

ZAPARTE, T. A. Aplicação dos métodos AHP e TOPSIS no estudo da durabilidade do concreto auto-adensável com adição de metacaulim e cinza de casca de arroz. 2018. 31. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

O concreto auto-adensável (CAA) vem sendo utilizado em larga escala, principalmente, nas últimas décadas, devido as suas propriedades mecânicas e até mesmo econômicas. Aliado a esse crescimento, há a preocupação ambiental, o que tem motivado estudos com o reaproveitamento de materiais, bem como a utilização de elementos menos agressivos ao meio-ambiente. Entre eles se encontra a adição mineral metacaulim e o resíduo industrial cinza de casca de arroz, materiais utilizados na composição do concreto em foco neste trabalho. Para a produção de um concreto mais durável e com menor impacto ambiental, muitas misturas são testadas e outros vários ensaios realizados. Em razão disso, este trabalho traz como contribuição a aplicação de ferramentas do processo decisório, o Analytic Hierarchy Process (AHP) e o Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), de forma a realizar uma interpretação sistêmica para obtenção da melhor decisão quanto as alternativas apresentadas em um estudo dedicado as propriedades de durabilidade do CAA. Com a utilização do AHP e o TOPSIS, verificou-se que a mistura com 10% de metacaulim e 10% de cinza de casca de arroz obteve um desempenho melhor quanto as propriedades de durabilidade do concreto estudado. Ainda, com a aplicação destas ferramentas, pode-se analisar os resultados dos ensaios de forma mais objetiva e global, contribuindo com a verificação da eficácia do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz no CAA, visto seu desempenho muito melhor ante a mistura sem estas adições.

Palavras-chave: AHP, TOPSIS, Concreto auto-adensável, Metacaulim, Cinza de Casca de Arroz

ABSTRACT

ZAPARTE, T. A. Application of AHP e TOPSIS methods in the study of the durability of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. 2018. 31. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

Self-compacting concrete (CAA) has been used in large scale, mainly in the last decades, owing to its mechanical and even economic properties. In addition to this growth, there is the environmental concern, which has motivated studies with the reuse of materials, as well as the use of elements less aggressive to the environment. Among them is the metakaolin mineral addition and the rice husk ash, which is a industrial residue, materials used in the composition of the concrete in focus in this work. For the manufacture of a more durable concrete with less environmental impact, many mixture proportions are tested and several other tests are carried out. As a result, this work brings the application of decision-making tools, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), in order to perform a systemic interpretation to obtain the best decision regarding the alternatives presented in a study dedicated to the properties of durability of the CAA. Through the application of the AHP and the TOPSIS, it was verified that the mixture with 10% metakaolin and 10% of rice husk ash had a better performance as regards the durability properties of the studied concrete. Also, with the application of this tools, the results of the tests can be analyzed in a more objective and global manner, contributing to the verification of the efficacy of the use of metakaolin and rice hull ash in CAA, because its performance was better than the blend without these additions.

Keywords: AHP, TOPSIS, Self-compacting Concrete, Metakaolin, Rice Husk Ash

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do TOPSIS em duas dimensões.....17

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Critérios	20
Tabela 2 – Alternativas	20
Tabela 3 – Escala de Saaty	21
Tabela 4 – Índices randômicos	21
Tabela 5 – Classificação dos ensaios quanto custo ou benefício	23
Tabela 6 – Matriz comparativa dos critérios	24
Tabela 7 – Matriz de decisão do método TOPSIS	24
Tabela 8 – Matriz normalizada	24
Tabela 9 – Matriz normalizada ponderada	25
Tabela 10 – Matriz solução negativa ideal	25
Tabela 11 – Matriz solução positiva ideal	25
Tabela 12 – <i>Ranking</i> das alternativas avaliadas	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVO.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 COLETA DE DADOS	20
3.2 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5 CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e a busca do mercado por melhorias em suas características tem aumentado a demanda de um tipo específico, o concreto auto-adensável (CAA). Surgido no Japão no ano de 1986, visava a utilização em estruturas com elevada densidade de armaduras e difícil acesso.

Aliado ao crescente uso desse material, há a preocupação quanto ao seu impacto ambiental, visto a grande liberação de CO₂ (dióxido de carbono) pelo seu principal componente, o cimento, bem como o emprego de agregados naturais em sua composição.

O concreto-auto adensável possui atributos muitos importantes para a construção, sendo capaz de conferir grandes benefícios em suas propriedades mecânicas, e até mesmo, econômicas. A habilidade de preenchimento, habilidade de passar entre obstáculos e resistência à segregação refletem as principais características deste tipo de concreto, conferido sua característica de adensabilidade (GOMES; BARROS, 2009).

Por outro lado, a alta demanda por este concreto motiva a preocupação em relação aos impactos ambientais, os quais são gerados, principalmente, na fabricação e extração de seus componentes. A partir disto, na última década, estudos e métodos veem sendo pesquisados para empregar materiais reciclados e/ou menos agressivos ao meio ambiente.

Entres eles, tem-se o metacaulim (MC) e a cinza de casca de arroz (CAA). O primeiro com o intuito principal de substituir o cimento e o segundo a areia natural, a qual é retirada de leitos de rios e é o principal agregado fino utilizado na fabricação de concreto.

O metacaulim é uma mistura mineral disponível comercialmente e utilizada comumente para reduzir o teor de clínquer no cimento, o qual possui um grande impacto ambiental decorrente do seu processo de produção. Ainda, estudos mostram que o metacaulim influencia de forma positiva propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à compressão.

Já, a cinza de casca de arroz é um subproduto industrial que vem sendo utilizada como adição ou substituição de parte dos agregados finos do concreto,

conferido uma resistência à compressão maior devido ao composto SiO_2 (sílica) que reage com o cimento.

A adição de minerais como o metacaulim e resíduos industriais como a cinza de casca de arroz, também podem contribuir com a durabilidade do concreto. Pesquisas neste segmento têm mostrado que o uso desses materiais possui um efeito positivo na porosidade do concreto, conferindo uma resistência maior à ataques por sulfato e cloretos.

O estudo do metacaulim e da cinza de casca de arroz no concreto auto-adensável, quanto a durabilidade, é um importante passo para verificar como esses materiais em conjunto afetariam propriedades tão importantes. Ainda, a inserção da cinza de casca de arroz poderia reduzir o alto custo do CAA, além de eliminar seu descarte no meio ambiente.

1.1 OBJETIVO

À vista do exposto, este trabalho traz como objetivo a aplicação das ferramentas *Analytic Hierarchy Process (AHP)* em conjunto com o *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, de forma a realizar uma interpretação sistêmica e simplificada para obtenção da melhor decisão quanto as alternativas dispostas no estudo de Gill e Siddique (2018), o qual aborda a durabilidade do CAA com a incorporação de metacaulim e cinza de casca de arroz.

Deste modo, tais ferramentas do processo decisório são apresentadas com o intuito de contribuir com a análise dos resultados, ajudando ao pesquisador, bem como ao leitor, a obter respostas mais objetivas quanto ao tema abordado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para ser considerado auto-adensável, o concreto deve apresentar em seu estado fresco, fluidez, resistência à segregação e habilidade passante para que escoe sem dificuldade entre as barras de aço (EFNARC, 2002). Essas propriedades são adquiridas a partir da otimização da proporção de seus materiais constituintes, evitando a exsudação e segregação, situação comum deste tipo de concreto.

O CAA surgiu no Japão em meio a dificuldade de adensamento de concretos em estruturas complexas com grande densidade de armadura, as quais eram empregadas para resistir aos frequentes abalos sísmicos existentes no país. Além disso, havia a necessidade de obter estruturas mais duráveis, resultado da compactação inadequada, devido à mão-de-obra pouco especializada, além da baixa trabalhabilidade dos concretos, que dificultava o seu adensamento (BARROS; GOMES, 2009).

As propriedades de autoadensabilidade do CAA não são os únicos benefícios deste concreto, há outras vantagens que merecem destaque, como a redução da mão-de-obra no canteiro, por não haver necessidade de vibração; maior facilidade no espalhamento e nivelamento; aumento na durabilidade devido a facilidade de adensar, pois evita falhas de concretagem e grandes vazios decorrentes da má vibração; há um ganho ecológico, visto que pode ser inserido em sua composição altos teores de resíduos industriais como cinza volante, escória de alto forno ou cinza de casca de arroz (TUTIKIAN; DAL MOLIM, 2008).

Além da dosagem, outro quesito importante tem se destacado em estudos realizados com o CAA: a preocupação quanto a durabilidade deste material. Estruturas de concreto armado menos duráveis geram altos custos para sua reabilitação e/ou reparação, além dos impactos que os resíduos destas construções causam ao meio ambiente.

Baseado nesse contexto, pesquisas apontam que a adição de materiais finos, por exemplo, favorece as propriedades de durabilidade, pois ao aumentar a quantidade de partículas finas, melhora a homogeneidade da pasta. Além disso, dificulta a penetração de agentes externos agressivos, cenário que afeta diretamente a durabilidade do concreto.

Outrossim, os finos atuam como pontos de nucleação, fazendo com que o cimento reaja com a água mais rapidamente, obtendo-se um ganho de resistência importante nas primeiras idades (TUTIKIAN; DAL MOLIM, 2008).

Entre as adições minerais com grande quantidade de finos que afetam as propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável, destaca-se o metacaulim, o qual já é comercialmente vendido em vários países, inclusive no Brasil. Além da facilidade de acesso e grande produção no cenário nacional, seu uso em concretos é, inclusive, normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O metacaulim é um material de natureza pozolânica ativa e tem como principais componentes alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) (AMBROISE, 1994). A reação pozolânica reage com a portlandita, resultando em gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável por conferir resistência mecânica ao concreto.

Ao estudar a substituição do cimento Portland em partes por metacaulim no CAA, Dadsetan e Bai (2017) verificou um efeito positivo na resistência à compressão. O concreto com 20% de MC, por exemplo, resultou em um aumento extraordinário na resistência à compressão em todas as idades pesquisadas (7, 28 e 56 dias), especialmente, nas primeiras idades (7 dias), quando alcançou uma resistência de 77,7 MPa com uma relação de água/cimento de 0,4.

Referidos resultados se deram, principalmente, devido à rápida reação pozolânica do metacaulim, em razão da grande quantidade de silício encontrada neste material, cerca de 25%. A grande área superficial das partículas do metacaulim também influenciam nesta reatividade. Essas características aumentam a formação do gel C-S-H no estado fresco do concreto, influenciando as propriedades do estado endurecido, como a resistência e durabilidade (DADSETAN; BAI, 2017).

Ainda, no que diz respeito as propriedades de durabilidade do concreto, estudos mostram que o metacaulim tende a reduzir substancialmente a permeabilidade ou porosidade do concreto e aumentar a resistência aos agentes agressores, principalmente cloretos, em razão do efeito de preenchimentos das partículas pelo MC (DINAKAR et al., 2012; DADOGIANNIS, 2015).

A utilização do metacaulim no concreto, além de melhorar as propriedades já mencionadas, possui grande vantagem ambiental. Inicialmente devido ao aumento da durabilidade, e também por ser considerado um material sustentável devido as

menores emissões de CO₂ (dióxido de carbono) em seu processo produtivo quando comparado ao clínquer, principal componente do cimento.

Por outro lado, o alto custo do metacaulim poderia ser uma desvantagem. No entanto, assim como recorda Badogianni (2015), uma maior implementação na indústria de cimento e concreto, em razão de suas vantagens tecnológicas e ambientais, poderia diminuir potencialmente o custo de produção do MC e, conseqüentemente, o custo final do concreto que englobe este material.

Ademais, a possibilidade de adicionar grandes quantidades de resíduos industriais no CAA, como a cinza de casca de arroz, contribuiria com a redução do custo deste concreto, além de aumentar seu mérito ambiental.

A cinza de casca de arroz é um subproduto agrícola encontrado em larga escala em regiões de grande produção deste grão, no Brasil, o Sul é o local com a maior incidência desta produção. A casca de arroz é utilizada para combustão em caldeiras nas fábricas de arroz e o resíduo (cinza) é descartado em aterros.

Quando queimada sob condições controladas de incineração, a cinza de casca de arroz é composta principalmente de sílica amorfa, material que pode representar até 90% em massa de sua composição (PRASITTISOPIN; TREJO, 2015). A reatividade do cimento Portland com a sílica é responsável por conferir concretos mais resistentes e duráveis.

No estudo realizado por Chopra et al. (2015), a substituição de parte do cimento por cinza de casa de arroz no CAA apresentou efeito positivo na resistência à compressão, bem como na redução da porosidade e permeabilidade do concreto. Os resultados também mostraram maior formação de gel C-S-H, provavelmente devido a reação das partículas da cinza de casca de arroz com a água e hidróxido de cálcio, o que explicaria os resultados obtidos quanto a resistência à compressão e a estrutura mais densa.

Corroboram com os resultados de Chopra et al. (2015), a pesquisa de RAISI et al. (2018), o qual verificou um efeito positivo nas propriedades mecânicas do CAA contendo cinza de casca de arroz. No respectivo estudo, houve um especial aumento de resistência inicial do concreto, que, segundo o autor, foi provavelmente em virtude das partículas de CCA serem altamente reativas. Estas reagem com água e hidróxido de cálcio para produzir mais C-S-H, resultando em um CAA com a microestrutura mais densa.

Apesar de muitos estudos encontrados na literatura com a utilização de cinza de casca de arroz no CAA, como os supramencionados, há poucos trabalhos referente a substituição de agregados finos por CCA. A maioria dos trabalhos foram realizados a partir da substituição do cimento pela cinza de casca de arroz (GILL; SIDDIQUE, 2017).

Dessa forma, estudar a utilização da cinza de casca de arroz em concreto, certamente, ajudaria a minimizar problemas ambientais, custo de produção, energia e esgotamento dos recursos naturais, como os agregados comumente utilizados (KHAN et al., 2012).

Como um adendo, o metacaulim entraria com sua contribuição quanto as propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável. Mas, para que isso seja viável, é necessário formular e, posteriormente, escolher uma mistura mais eficiente.

No entanto, assim como comenta Mattana et al. (2012), a grande quantidade de resultados obtidos nos diversos ensaios realizados com concreto, torna difícil tomar uma decisão global com relação a mistura que seria mais interessante.

Neste contexto, a aplicação de ferramentas do processo decisório, como o Analytic Hierarchy Process (AHP) e o Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), auxiliaria na escolha mais objetiva da mistura ideal para formulação de um CAA com as melhores características quanto ao objetivo proposto.

O processo de hierarquia analítica é um método de decisão multicritério (MCDM) formulado por Thomas Saaty na década de 1970. Seu objetivo é apoiar os tomadores de decisão que enfrentam vários critérios e alternativas no processo decisivo (TOLOIE-ESHLAGHY; HOMAYONFAR, 2014), contribuindo na formulação e solução quantitativa de seus problemas (SAATY, 1977).

Conforme explica Srdjevic (2005):

O AHP aplica-se ao problema de decisão depois de estruturado hierarquicamente em diferentes níveis, cada nível consistindo de um número finito de elementos. O AHP procura as prioridades que representam a importância relativa dos elementos de decisão em cada nível particular. Por agregação aditiva, finalmente calcula as prioridades dos elementos no nível inferior da hierarquia, geralmente conhecidas como alternativas. Suas prioridades são interpretadas com relação à meta geral no topo da hierarquia, e elementos em

níveis superiores, como critérios, subcritérios, etc., são usados para mediar o processo de comparação.

O método AHP é iniciado a partir da definição de um objetivo ou meta, onde se relaciona uma série de critérios com as alternativas do problema, o qual é organizado de forma hierárquica para melhor representação.

De forma geral, o modelo se organiza em três níveis hierárquicos. O primeiro é referente a meta ou o objetivo do problema, necessário para definição dos critérios inseridos no segundo nível. Enquanto as alternativas, correspondentes ao terceiro nível, são as opções escolhidas pelo tomador de decisão para atingir o objetivo. Conforme a complexidade do problema, múltiplos níveis de critérios e subcritérios poderão ser usados no modelo de hierarquização.

Enquanto o TOPSIS é uma técnica de preferência de ordem por semelhança com a solução ideal desenvolvida por Hwang e Yoon (1981), a qual se baseia no conceito de que a melhor alternativa corresponde a distância mais curta da solução ideal positiva e a mais distante da solução ideal negativa.

Na figura 1, são representadas a solução ideal positiva (mais desejada) e a solução ideal negativa (menos desejada) em um sistema de duas dimensões, cada uma representando um objetivo. O TOPSIS representa este projeto imaginário a partir de uma combinação dos melhores atributos de desempenho ante todo o conjunto de soluções consideradas (LAFLEUR, 2011). A combinação mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa será considerada a melhor perante o método TOPSIS.

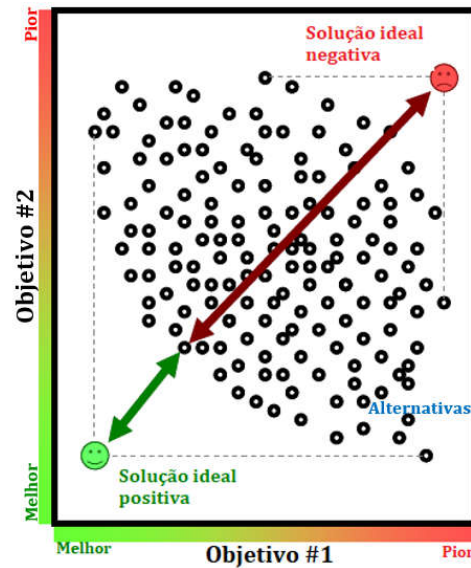


Figura 1 – Representação do TOPSIS em duas dimensões.

Fonte: Adaptado de Lafleur (2011)

O método TOPSIS avalia uma matriz de decisão que consiste em m alternativas (linhas) e n critérios (colunas), a partir da intersecção entre eles. O TOPSIS assume que cada atributo na matriz de decisão tem utilidade decrescente ou monotônica decrescente. Dessa forma, quanto maior o resultado do atributo, maior a preferência pelo critério "benefício" e menor a preferência pelo critério "custo" (HWANG e YOON, 1981).

3 METODOLOGIA

Para a realização desta pesquisa foi utilizada dois métodos de tomada de decisão, o AHP e o TOPSIS, visando mensurar a melhor alternativa diante de várias opções apresentadas neste trabalho. Neste caso, tem-se que a decisão a ser tomada é a escolha da mistura de concreto auto-adensável que possui melhor desempenho quanto as propriedades de durabilidade.

A utilização do AHP em conjunto com o TOPSIS se deu devido a complementação de ambos para o objetivo deste trabalho. Pois, apesar da simplicidade da aplicação do TOPSIS, este necessita de especificações quanto as ponderações dos tomadores de decisão. Assim, o método AHP é importante para avaliar a consistência dos pesos atribuídos aos critérios (LAFLEUR, 2011).

Ainda, na engenharia civil, métodos como o AHP e o TOPSIS ainda são pouco explorados e a conclusão dos resultados obtidos nos diversos ensaios que, em geral, são necessários, baseiam-se em análises qualitativas. Assim, sua utilização possibilitaria decisões mais objetivas dentre as alternativas estudadas, além da visualização prática e fácil dos resultados.

Dessa forma, a pesquisa se desenvolveu em duas etapas principais, a primeira utilizando o AHP para verificar a consistência dos julgamentos realizados pelo tomador de decisão. Em razão de ser a única técnica de Tomada de Decisão Multicritério que possui um mecanismo efetivo para verificar a consistência da ponderação definida pelo tomador de decisão, exigindo que o mesmo seja consistente em suas escolhas (KHAIRA; DWIVEDI, 2017). Dessa forma, fornece mecanismos para melhorar a consistência das comparações, quando estas não forem perfeitamente sólidas (TRANTAPHYLLOU; MANN, 1995).

Em seguida foi aplicado o TOPSIS para prosseguir na resolução da matriz de decisão, em decorrência da simplicidade deste método, evitando o grande número de comparações paritárias existentes no AHP, bem como a complexidade de seus cálculos.

2.1 COLETA DE DADOS

Quanto aos dados utilizados para a realização deste trabalho, foram obtidos de Gill e Siddique (2018), os quais estudaram as propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável com metacaulim e cinza de casca de arroz.

Para isso, os autores confeccionaram três misturas com metacaulim como substituto do cimento em massa na proporção de 5, 10 e 15%, e com a substituição dos agregados finos por CCA na proporção de 10%. Um total de quatro misturas foram confeccionadas, entre elas a de referência, as quais foram utilizadas neste trabalho como as alternativas do processo de decisão.

Já, para analisar as propriedades de durabilidade do concreto, foi utilizado os resultados de sete ensaios realizados no estudo de Gill e Siddique (2018). Tais valores entraram como critérios na matriz de decisão.

As tabelas 1 e 2 apresentam as misturas e os ensaios confeccionados por Gill e Siddique (2018) e utilizados neste trabalho. Estes foram organizados para dispor a matriz de combinações usada no processo de análise hierárquica, que engloba alternativas (misturas) e critérios (ensaios).

Tabela 1 – Critérios

Ensaio (critérios)	Estágio do concreto
C1 - Relação água-cimento (a/c)	Dosagem
C2 - Consumo de cimento por m ³	Dosagem
C3 - Resistência à compressão	Estado endurecido
C4 - Resistência a sulfatos	Estado endurecido
C5 - Absorção de água	Estado endurecido
C6 - Porosidade	Estado endurecido
C7 - Penetração de cloretos	Estado endurecido

Tabela 2 – Alternativas

Misturas (alternativas)	Definição
A1	Mistura de referência
A2	5% de Mc e 10% de CCA
A3	10% de Mc e 10% de CCA
A4	15% de Mc e 10% de CCA

2.2 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

A escala fundamental de Saaty (tabela 3) foi utilizada para definir as prioridades dos critérios de avaliação, a qual atribui valores segundo a importância de um critério em relação a outro.

Tabela 3 – Escala fundamental de Saaty

Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Um critério é levemente superior que o outro
5	Importância forte	Um critério é fortemente mais importante que o outro
7	Importância muito forte	Um dos critérios é predominante sobre o outro
9	Importância absoluta	Um dos critérios é absolutamente predominante sobre o outro
2,4,6,8	Valores intermediários	Valores intermediários em relação aos expostos acima

Fonte: Adaptado de Saaty, 1990.

Para avaliar os julgamentos realizados pelo tomador de decisão, em relação a matriz de prioridades dos critérios, aplicou-se o método de Normalização Aditiva a partir do Índice de Consistência Harmônica proposto por Stein e Mizzi (2007). Esta avaliação consiste em determinar a Razão De Consistência (RC) a partir da razão entre o Índice de Consistência Harmônica (ICH) e o Índice Randômico (IR). O resultado não poderá ultrapassar 0,1 ou 10% para que os julgamentos sejam considerados válidos, conforme estipula o método AHP.

Stein e Mizzi (2007) propõem uma tabela com os Índices Randômicos, conforme mostra a tabela 4, cujo valor depende do tamanho da matriz analisada (n). Enquanto o Índice de Consistência Harmônica é calculado conforme a seguinte fórmula:

$$ICH = \frac{[HM(s)-n](n+1)}{n(n-1)}$$

(1)

Tabela 4 – Índices randômicos

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
IR	0,550	0,859	1,061	1,205	1,310	1,381	1,437	1,484	1,599	1,650	1,675

Fonte: Stein e Mizzi, 2007.

A partir dos pesos dos critérios encontrados com o AHP, seguiu-se os passos do método TOPSIS para resolução da matriz de decisão e ordenação das alternativas, conforme Hwang e Yoon (1981):

- a) Construção da matriz de decisão normalizada a fim de transformá-la numa matriz adimensional para que seja possível a comparação entre os vários critérios;
- b) Construção da matriz de decisão normalizada ponderada, multiplicando cada coluna da matriz normalizada pelo seu respectivo peso;
- c) Determinação das soluções positivas (benefícios) e negativas (custos) ideais, ou seja, o maior valor é melhor para um critério benéfico (+), enquanto para o critério custo (-) se aplica o inverso;
- d) Cálculo da medida de separação, distâncias entre as alternativas e as soluções positivas e negativas ideais;
- e) Cálculo da proximidade relativa à solução ideal;
- f) Classificação da ordem de preferência (*ranking*).

A partir da classificação da ordem de preferência, será possível visualizar o maior valor obtido, o qual representará a melhor opção quanto as misturas de CAA confeccionadas por Gill e Siddique (2018), no que diz respeito as propriedades de durabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classificação dos ensaios quanto ao critério benefício (quanto maior o resultado melhor) e custo (quanto menor o resultado melhor) são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Classificação dos ensaios quanto custo ou benefício

Ensaio	Critério
Relação água-cimento (a/c)	Custo (-)
Consumo de cimento (kg/m ³)	Custo (-)
Resistência à compressão (Mpa)	Benefício (+)
Resistência ao sulfato - perda de massa (%)	Custo (-)
Absorção de água (%)	Custo (-)
Porosidade (%)	Custo (-)
Penetração de cloretos (Columbs passado)	Custo (-)

A partir dos resultados dos ensaios, foi elaborado uma matriz de combinação pareada para avaliar a importância relativa entre os critérios e a meta do trabalho: a mistura de CAA com melhor desempenho quanto as propriedades de durabilidade.

Optou-se por dar a mesma importância entre os critérios, pois todos os ensaios elencados possuem influência significativa para a meta estipulada. Outrossim, não faz parte do escopo deste trabalho determinar qual propriedade possui maior relevância quanto a durabilidade do CAA.

A tabela 6 apresenta a matriz pareada de importância, nela consta o peso relativo que cada critério terá na decisão final, o qual foi de 0,143 ou 14,3%. Este valor foi calculado a partir da soma do vetor de cada coluna, correspondente ao valor individual de cada critério, e dividido pela soma total dos critérios.

Em sequência foi verificado a consistência dos dados. Tendo como base Stein e Mizzi (2007), foi calculado a razão de consistência (RC) a partir do IC e do IR. Em razão da importância igual dada a todos os critérios, o valor obtido para o RC foi igual a 0 (zero), o que corresponde ao desejado em uma matriz de comparação, do ponto de vista do AHP.

O próximo passo foi a normalização dos dados, para que os valores ficassem na mesma escala, conforme o método TOPSIS. Os resultados são mostrados na tabela 7.

Tabela 6 – Matriz comparativa dos critérios

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	1	1	1	1	1	1
C2	1	1	1	1	1	1	1
C3	1	1	1	1	1	1	1
C4	1	1	1	1	1	1	1
C5	1	1	1	1	1	1	1
C6	1	1	1	1	1	1	1
C7	1	1	1	1	1	1	1
Total (Soma)	7	7	7	7	7	7	7
Peso relativo de cada critério	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143

Tabela 7 – Matriz de decisão do método TOPSIS

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5 (-)	C6 (-)	C7 (-)
A1	0,44	480	48,35	17,9	6,8	10,4	171
A2	0,44	456	61,1	7	3,7	5,4	50
A3	0,44	432	71,45	4,8	4,1	8,1	38
A4	0,44	408	69,05	5,2	5,35	9,1	39
Vetor	0,88	889,62	126,27	20,48	10,26	16,90	186,30

Tabela 8 – Matriz normalizada

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5 (-)	C6 (-)	C7 (-)
A1	0,5000	0,5396	0,3829	0,8740	0,6625	0,6152	0,9179
A2	0,5000	0,5126	0,4839	0,3418	0,3605	0,3195	0,2684
A3	0,5000	0,4856	0,5659	0,2344	0,3994	0,4792	0,2040
A4	0,5000	0,4586	0,5468	0,2539	0,5212	0,5383	0,2093

Após a normalização, foi realizado a multiplicação de cada valor da matriz de comparação (tabela 8) pelo peso (0,143), o qual foi estipulado pelo AHP.

Em sequência, realizou-se o cálculo das distâncias entre as alternativas e as soluções positivas e negativas ideais e posteriormente a classificação das alternativas. Todos os cálculos foram realizados no Microsoft Excel® e os resultados são mostrados nas tabelas 9 ao 11, enquanto a classificação das alternativas é apresentada na tabela 12.

Tabela 9 – Matriz normalizada ponderada

	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
A1	0,0714	0,0771	0,0547	0,1249	0,0946	0,0879	0,1311
A2	0,0714	0,0732	0,0691	0,0488	0,0515	0,0456	0,0383
A3	0,0714	0,0694	0,0808	0,0335	0,0571	0,0685	0,0291
A4	0,0714	0,0655	0,0781	0,0363	0,0745	0,0769	0,0299

Tabela 10 – Matriz solução negativa ideal

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5 (-)	C6 (-)	C7 (-)	Solução (-)
A1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
A2	0,0000	-0,0039	0,0144	-0,0760	-0,0431	-0,0423	-0,0928	0,1351
A3	0,0000	-0,0077	0,0261	-0,0914	-0,0376	-0,0194	-0,1020	0,1459
A4	0,0000	-0,0116	0,0234	-0,0886	-0,0202	-0,0110	-0,1012	0,1389

Tabela 11 – Matriz solução positiva ideal

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5 (-)	C6 (-)	C7 (-)	Solução (+)
A1	0,0000	0,0116	-0,0261	0,0914	0,0431	0,0423	0,1020	0,1524
A2	0,0000	0,0077	-0,0117	0,0153	0,0000	0,0000	0,0092	0,0227
A3	0,0000	0,0039	0,0000	0,0000	0,0056	0,0228	0,0000	0,0238
A4	0,0000	0,0000	-0,0027	0,0028	0,0230	0,0313	0,0008	0,0390

Tabela 12 – Ranking das alternativas avaliadas

Ranking	Mistura	Desempenho
1	A3	0,8597
2	A2	0,8560
3	A4	0,7808
4	A1	0,0000

A partir da análise da tabela 12 é possível concluir que a melhor alternativa de acordo com o TOPSIS é a A3, a qual corresponde ao CAA confeccionado com 10% de metacaulim e 10% de cinza de casca de arroz.

O método também mostrou que as alternativas A3 e A2 alcançaram um resultado semelhante. Já, a alternativa A1, que corresponde ao CAA de referência, obteve o pior desempenho em todos os critérios, motivo de aparecer com zero no resultado mostrado nas tabelas 10 e 11.

Os resultados quantitativos apresentados pelo método de decisão aplicado, mostram que o uso do MC em substituição ao cimento Portland, juntamente com a CCA em substituição ao agregado miúdo, afetou positivamente as propriedades de durabilidade do concreto estudado por Gill e Siddique (2018).

Ainda, os resultados demonstraram que a adição de metacaulim e CCA em 10% seria a proporção ideal, visto que, a partir dessa porcentagem as propriedades relacionadas a durabilidade do concreto auto-adensável não apresentam alteração positiva significativa, conforme demonstrado matematicamente pelas ferramentas aplicadas.

5 CONCLUSÃO

A aplicação do AHP e TOPSIS permite aos tomadores de decisão uma ferramenta matemática importante para ajudá-los em suas escolhas, permitindo um entendimento mais adequado quanto a alternativa mais interessante diante de seu objetivo.

O método aplicado a seleção da melhor mistura de CAA quanto suas propriedades de durabilidade, mostrou-se muito eficaz, visto que foi possível visualizar de forma mais objetiva os resultados, conforme as prioridades estabelecidas.

Ainda, a facilidade de modelagem do processo ao se estabelecer os critérios, bem como as alternativas, contribuem para que o tomador de decisão possa analisar as diversas possibilidades de misturas que há para a produção do CAA. Deste modo, suas escolhas ficarão mais objetivas e sua decisão terá um melhor respaldo, além de ser adaptável às diversas necessidades do gestor.

No estudo de Gill e Siddique (2018), a análise foi realizada a partir da conjectura sobre os resultados individuais de cada ensaio. Cenário que dificulta uma escolha mais precisa quanto a mistura que obteve o melhor desempenho, devido a quantidade de ensaios, bem como a variação de resultados em relação a cada concreto confeccionado.

À vista disto, a utilização do AHP e TOPSIS mostrou um resultado mais objetivo e de fácil compreensão, onde, a partir das prioridades estabelecidas, verificou-se que a mistura incorporando 10% de metacaulim e 10% de cinza de casca de arroz obteve um desempenho melhor quanto as propriedades de durabilidade do CAA.

Outrossim, com a aplicação destes métodos, pode-se analisar de forma quantitativa o comportamento das misturas estudadas. A alternativa A3, por exemplo, apresentou um desempenho melhor em relação as outras misturas com o uso de MC e CCA, mas pouco diferenciou da segunda colocada.

Em relação a mistura de referência, todas as outras alternativas obtiveram um resultado muito mais significativo, demonstrando a eficácia do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz em concretos auto-adensáveis.

Ante o exposto, conclui-se que aplicação de técnicas de decisão multicritério, como o AHP e o TOPSIS, são interessantes para utilizar na escolha de misturas de concretos quando este possui muitos critérios para serem analisados, pois oferece um suporte mais preciso na tomada de decisão.

Tendo em vista os aspectos observados, cabe destacar que, em razão dos inúmeros ensaios realizados com o concreto para estudo de suas características, a aplicação do modelo decisório estudado neste trabalho pode ser um diferencial na conclusão destas pesquisas.

REFERÊNCIAS

AMBOISE, J.; MAXIMILIEN, S.; PERA, J. **Properties of Metakaolin Blended Cements. Advanced Cement Based Materials.** Vol. 1, p. 161-168, 1994.

BADOGIANNIS, E. G.; SFIKAS, I. P.; VOUKIA, D. V.; TREZOS, K. G.; TSIVILIS G. **Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete.** Construction and Building Materials. Vol. 82, p. 133-141, 2015.

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R.; KUNAL. **Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash.** Biosystems Engineering. Vol. 130, p. 72-80, 2015.

DADSETAN, S.; BAI, J. **Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly.** Construction and Building Materials. Vol. 146, p. 658-667, 2017.

DINAKAR, P.; SAHOO, Pradosh K.; SRIRAM, G. **Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete.** International Journal of Concrete Structures and Materials. Vol.7, n.3, p.215–223, 2013.

DWIVEDI, R. K.; KHAIRA, A. **A State of the Art Review of Analytical Hierarchy Process.** Materials Today: Proceedings. Vol. 5, p. 4029–4035, 2018.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** Reino Unido, 2002.

GILL, S. A.; SIDDIQUE, R. **Durability properties of self-compacting concrete incorporating.** Construction and Building Materials. Vol. 176, p. 323-332, 2018.

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

HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications.** Berlin: Springer-Verlag, 1981.

KHAN, R.; JABBAR, A.; AHMAD, I.; KHAN, W.; KHAN, A. N.; MIRZA, J. **Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete.** Construction and Building Materials. Vol. 30, p. 360-33652, 2012.

KHAN, R.; JABBAR, A.; AHMAD, I.; KHAN, W.; KHAN, A. N.; MIRZA, J. **Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete.** Construction and Building Materials. Vol. 30, p. 360-33652, 2012.

LAFLEUR, J. M. **Probabilistic AHP and TOPSIS for Multi-Attribute Decision-Making under Uncertainty.** Aerospace Conference, IEEE, Montana, USA, p. 1–18, 2007.

MATTANA, A. J.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. M. M. **Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento.** Ambiente construído. Vol. 12, n.4, p. 63-79, 2012.

PRASITTISOPIN, L.; TREJO, D. **Hydration and phase formation of blended cementitious systems incorporating chemically transformed rice husk ash.** Construction and Building Materials. Vol. 59, p. 100-106, 2015.

RAISI, E. M.; AMIRI, J. V.; DAVOODI, M. R. **Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash.** Construction and Building Materials. Vol. 177, p. 148-157, 2018.

SAATY, T. **How to make a decision:** The analyt hierarchy process. European Journal of Operational Reserch. Vol. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica.** Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991

SAATY, T. **Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures.** Journal of mathematical psychology. Vol. 15, p. 234-281, 1977.

SRDJEVIC, B. **Combining diferent prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis.** Computers & Operations Research. Vol. 32, p. 1897–1919, 2005.

STEIN, W. E.; MIZZI, P. J. **The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process**. European Journal of Operational Research. Vol. 177, p. 488-297, 2007.

TOLOIE-ESHLAGHY, A.; HOMAYONFAR, M. **MCDM Methodologies and Applications: A Literature Review from 1999 to 2009**. Research Journal of International Studies. 2011.

TRIANANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. **Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges**. Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice. Vol. 2, n. 1, p. 35-44, 1995.

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