

MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO CONJUNTA DE PROCESSOS CONSTRUTIVOS EM OBRAS CIVIS

MULTICRITERIA MODEL FOR CONJUNCT SELECTION OF CONSTRUCTIVE PROCESSES IN CIVIL CONSTRUCTION

Joás Tomaz de Aquino

jta@discente.ifpe.edu.br

Prof^a Dra. Annielli Araújo Rangel Cunha

anniellirangel@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

O processo de tomada de decisão na indústria da construção civil envolve grande complexidade, no entanto, no dia-a-dia, muitas decisões ainda são tomadas de forma improvisada e não racional. Dessa forma, faz-se necessário o uso de metodologias consistentes para apoiar decisões no setor, sobretudo na etapa de planejamento, otimizando os recursos disponíveis e maximizando o valor dos processos construtivos. Assim, o objetivo deste trabalho foi propor um modelo multicritério para apoiar a seleção conjunta de processos construtivos. Através da revisão da literatura, foram propostas 5 etapas, que foram utilizadas em um exemplo ilustrativo de uma edificação familiar com térreo e pavimento superior, para demonstrar sua aplicabilidade. As etapas foram: Etapa 1: Seleção das alternativas, para os processos construtivos de fundação superficial, alvenaria de vedação e sistema de lajes. Etapa 2: Seleção dos critérios para cada processo construtivo com base na literatura. Etapa 3: Ponderação dos critérios por meio do método *Fuzzy SWARA* (*Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis*) para cada tipo de processo construtivo. Etapa 4: Sobreclassificação das alternativas por meio do método PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) para cada processo construtivo e análise visual por meio do PROMETHEE GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Aid*). Etapa 5: Utilização da programação linear para seleção de um conjunto ótimo de processos, a partir da sobreclassificação gerada na etapa anterior e com base na sinergia entre os processos analisados. Para a edificação analisada, levando em consideração a sinergia entre as etapas construtivas, sob a ótica da transmissão de cargas entre os elementos, obteve-se como conjunto ótimo os processos construtivos: *radier* (fundação superficial) + sistema *drywall* (alvenaria de vedação) + laje treliçada com EPS (sistema de laje). Dessa forma, esse estudo contribui com a apresentação de um modelo de otimização na construção civil, oferecendo ao decisor um modelo analítico e numérico para embasar a tomada de decisão na busca pela maximização da eficiência dos processos.

Palavras-chave: Construção Civil. Decisão. Multicritério. PROMETHEE. *Fuzzy*.

ABSTRACT

The decision-making process on construction industry involves great complexity, however, on a daily basis, many decisions are still taken in an improvised and non-rational way. Thus, it is necessary to use consistent methodologies to support decisions in the sector, especially in the planning stage, optimizing available resources and maximizing the value of construction processes. The objective of this work was to propose a multicriteria model to support the joint selection of construction processes. Through the literature review, 5 steps were proposed which were used in an illustrative example of a family building with ground floor and upper floor, to demonstrate its applicability. Step 1: Selection of alternatives, for the construction processes of superficial foundation, sealing masonry and slab system. Step 2: Selection of criteria for each construction process based on the literature. Step 3: Weighting the criteria using the Fuzzy SWARA method (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) for each type of construction process. Step 4: Outranking of alternatives using the PROMETHEE II method (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) for each construction process and visual analysis using PROMETHEE GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid). Step 5: Use of linear programming to select an optimal set, based on the outranking generated in the previous step and the synergy between the analyzed processes. For the analyzed building, taking into account the synergy between the construction stages, from the point of view of the transmission of loads between the elements, the construction processes obtained as an optimal set: radier (surface foundation) + drywall system (sealing masonry) + lattice slab with EPS (slab system). So this study contributes to the presentation of an optimization model in civil construction, offering the decision maker an analytical and numerical model to support the decision-making process in the search for maximizing the efficiency of processes.

Keywords: Civil Construction. Decision. Multicriteria. PROMETHEE. Fuzzy.

1 INTRODUÇÃO

O cenário de tomada de decisão na indústria da construção civil é complexo dada a natureza de suas atividades e a grande quantidade de variáveis internas e externas que vão moldando e interferindo nos processos construtivos ao longo das várias fases de um empreendimento (POLITO, 2015). Além disso, ao longo do sistema produtivo, existe a necessidade de coordenação entre as etapas de projeto, orçamento e execução, visando uma obra viável e racionalizada (MATTOS, 2010).

Durante o planejamento de um empreendimento, ainda nas etapas iniciais de sua concepção, entre diversas possibilidades, é necessário decidir qual o tipo de sistema construtivo a ser utilizado na obra, tendo em vista, o desejo de se conseguir um bom desempenho técnico e econômico. Porém, a escolha do sistema construtivo inadequado, poderá ocasionar uma série de limitações em todo o ciclo de vida do projeto e na fase de execução, como retrabalho, desperdício de materiais, possibilitando o surgimento de patologias e manutenções excessivas futuramente, entre outras possibilidades (MATTOS, 2010).

Segundo Félix (2017), o cenário brasileiro é caracterizado pela falta ou postergação do processo de tomada de decisão, com destaque nas fases iniciais de elaboração do projeto, em relação aos aspectos referentes às características do produto e às decisões sobre as tecnologias construtivas a serem utilizadas. Como consequência, tem-se um elevado nível de desperdícios, com erros e retrabalhos para toda a equipe de projeto, sendo esse um dos principais gargalos que ocasionam reflexos negativos na qualidade do produto e no tempo de entrega (FONTENELLE; MELHADO, 2000).

Além do mais, no cotidiano das construtoras tem-se vários tipos de problemas, dentre os quais destaca-se a falta de sistematização nos processos de decisão, com a escassez de metodologias estruturadas e baseadas em técnicas racionais que possam apoiar o processo de tomada de decisão. Assim, muitas lacunas podem surgir decorrente do fato de que muitas diretrizes são respaldadas apenas pela intuição, experiências ou até mesmo no momento da execução do processo construtivo, sem o apoio de critérios e procedimentos técnicos e científicos, sobretudo baseados na lógica quantitativa (POLITO, 2015).

As mudanças e soluções tecnológicas, por exemplo, nas áreas de novos materiais e na automatização dos processos, resultantes da inovação tecnológica, podem contribuir para a resolução de muitos desses gargalos. Além das tecnologias conhecidas e aplicadas pelas empresas, é preciso monitorar aquelas ainda não utilizadas, buscando trazer maior vantagem competitiva para as construtoras, sobretudo diante de momentos de incerteza, estagnação da economia e crescimento reduzido (ZAVADSKAS *et al.*, 2017; CRUZ *et al.*, 2019). No entanto, faz-se necessário ponderar, de forma racional, os benefícios e malefícios que as novas soluções tecnológicas podem gerar para um empreendimento, tendo em vista que cada projeto tem as suas especialidades.

Diante das informações apresentadas até o momento e da realidade de muitas empresas privadas e órgãos públicos que realizam obras e serviços de Engenharia, onde ainda se tomam decisões com base em experiências passadas e *expertise* de algumas pessoas de sua equipe técnica, este trabalho se justifica por propor um modelo racional de decisão multicritério visando auxiliar a estruturação e sistematização da seleção dos processos construtivos para obras civis dessas instituições, em que, as complexidades e possíveis incertezas que acompanham um problema são incluídas dentro de uma estrutura lógica, passível de uma análise abrangente. O objetivo não é ignorar o *know-how* dos especialistas, eventos passados e preferências políticas, mas incluí-los em uma modelagem analítica e quantitativa, considerando critérios, incertezas e interdependências na análise, com seus resultados, criando subsídios para orientar o planejamento, o processo de dimensionamento e a compatibilidade de projetos.

No campo teórico foram identificados diversos trabalhos que usam técnicas de análise multicritério, como os trabalhos de Cruz *et al.* (2019), Moghtadernejad *et al.* (2019), Ighravwe *et al.* (2019), Turskis *et al.* (2016) e Bollella *et al.* (2013). No entanto, não foram identificados trabalhos que formassem um conjunto de processos construtivos, considerando as interligações existentes entre eles, de modo a apoiar a seleção conjunta, isto é, de forma simultânea.

Assim, a utilização de um modelo multicritério possui o potencial de auxiliar o processo de planejamento, na construção civil, ao auxiliar os tomadores de decisão a organizar e sintetizar informações, analisando alternativas e compará-las sob diversos

critérios simultaneamente e, com isso, reduzir a possibilidade de arrependimentos por estarem convencidos que todos os principais aspectos do problema e suas consequências e implicadores foram devidamente explorados no processo decisório (ALMEIDA, 2013). Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi propor um modelo multicritério para apoiar a seleção conjunta de processos construtivos.

Além deste tópico introdutório, para um maior entendimento da pesquisa desenvolvida, a mesma está estruturada da seguinte forma: no tópico 2 são apresentados alguns conceitos teóricos sobre os processos construtivos e dos métodos utilizados. No tópico 3 são caracterizadas as etapas metodológicas utilizadas. Já no tópico 4 são apresentados os resultados obtidos e, por fim, as considerações finais, no tópico 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico tem como fim sistematizar o conhecimento acerca de determinada área de estudo. Partindo desse pressuposto, nesta seção procurou-se refletir sobre os pilares teóricos deste trabalho, que fundamentam o modelo proposto: procedimento para seleção de critérios e alternativas, decisão multicritério, agregação de escolhas e análise de sensibilidade.

Para isso utilizou-se de pesquisas em vários meios: artigos científicos, normas técnicas, livros, relatórios, dissertações e teses. Dessa forma, no presente tópico, apresenta-se a literatura desenvolvida sobre o tema.

Esta seção está estruturada da seguinte maneira: a primeira parte contém uma caracterização dos processos construtivos a serem analisados no exemplo ilustrativo, e em seguida será abordada a metodologia multicritério para apoio a tomada de decisão.

2.1 Processos construtivos

2.1.1 Fundações

A fundação, ou subestrutura, de uma edificação é o elemento estrutural responsável por transmitir as cargas para o solo, isto é, é responsável pela interação solo-estrutura (SILVA, 2018). A depender da geometria da edificação, das cargas que chegam na fundação e do tipo de solo do terreno pode ser escolhido o tipo de fundação. Segundo a NBR 6122/2010 (ABNT, 2010), as fundações podem se dividir em dois grandes grupos, as rasas (que incluem as sapatas, *radier* e blocos) e profundas (estacas de diversos materiais e modos construtivos e os tubulões).

Podem ser utilizadas fundações rasas (ou diretas) quando o solo mais superficial tem capacidade de receber cargas estruturais, assim a transmissão dessas para o solo ocorre pelas tensões distribuídas sob a base da fundação. Já as fundações profundas (ou indiretas) são utilizadas quando o solo superficial não apresenta rigidez ou as cargas que chegam na fundação são grandes e cujas bases estão implementadas a mais de duas vezes sua menor dimensão e a pelo menos três metros de dimensão (ABNT, 2010). Nesse último caso, a transmissão de cargas para o terreno ocorre pela base (resistência de ponta) ou pela superfície lateral (resistência de fuste) ou por ambas (ABNT, 2010).

Ainda, no seu dimensionamento as fundações devem apresentar uma resistência suficiente para suportar as ações aplicadas (não entrando em colapso, isto é,

atendendo ao estado-limite último (ELU)) e evitar deformações excessivas quando sujeitas às cargas aplicadas, ocasionando patologias e perda de funcionalidade (atendendo ao estado-limite de serviço (ELS)) (KNAPPETT; CRAIG, 2018).

2.1.2 Alvenaria de vedação

Segundo Sabbatini (1997), vedação vertical é um subsistema de um edifício que compartimenta e determina os ambientes internos, impedindo a ação de agentes indesejáveis. A alvenaria pode exercer duas funções, a saber: vedação e estrutural. O sistema de vedação se limita a fechar os ambientes e/ou dividi-los, já o sistema estrutural, além de fazer essas mesmas funções, ele também exerce a função de fazer a estruturação da edificação, onde não se faz uso de lajes, pilares e vigas, que são os elementos utilizados, obrigatoriamente, quando se escolhe fazer o sistema de vedações. Existem diversos materiais que uma alvenaria pode ser construída, são eles: blocos cerâmicos, blocos de concreto, estrutura metálica com fechamento em gesso ou em lã mineral, por exemplo, concreto auto adensável, entre outros.

Por isso, segundo Sabbatini (2003) recomenda-se que para a escolha da tecnologia a ser empregada devem ser avaliados alguns aspectos como: (i) Critérios de desempenho que a vedação vertical deve cumprir – desempenho térmico e acústico, estanqueidade à água, controle de passagem de ar, proteção e resistência contra a ação do fogo, desempenho estrutural, controle de iluminação e durabilidade; (ii) Aspectos construtivos – facilidade de execução, produtividade, disponibilidade de pessoas habilitadas a executar o serviço e materiais necessários para o serviço, bem como equipamentos e mecanização acessíveis; (iii) Aspectos ligados ao uso e manutenção.

Assim, a escolha da tecnologia a ser empregada, envolve um problema de decisão em que diferentes critérios, devem ser ponderados, com vista a atender, tanto quanto possível a maior quantidade de objetivos definidos.

2.1.3 Lajes

Lajes são elementos construtivos planos, bidimensionais, constituídos de uma largura e comprimento, que muitas vezes funcionam como isolamento e separação de pavimentos, geralmente constituídos de esforços solicitantes verticais (perpendiculares ao seu plano) e que transmitem as cargas para vigas ou pilares que suportam seu peso próprio (ABNT, 2014). Também denominado de placa, as lajes atuam como chapas, principalmente em edifícios altos, pois existe um considerável esforço tangencial que acaba por influenciar paralelamente ao plano da placa (DORNELES, 2014; ARAÚJO, 2010). As lajes atuam de duas formas: atuando como placa e resistindo a esforços normais de compressão e atuando como chapa, resistindo a esforços tangenciais (DORNELES, 2014; ABNT, 2014).

Assim, o sistema de lajes de uma edificação é um dos itens mais importantes durante a realização da obra, já que ela suportará os pesos verticais acima colocados, seja de um pavimento tipo ou apenas para resistir aos esforços normais e tangenciais que poderão vir a atuar (ARAÚJO, 2010). Esse elemento estrutural para ser dimensionado passa por diversos processos, incluindo a escolha do tipo da laje (entre várias tecnologias disponíveis atualmente) que será utilizada até o seu dimensionamento e posterior execução, sendo esse processo influenciado pelos materiais e mão de obra disponíveis, restrições estruturais e executivas específicas

da obra, sinergia entre os demais sistemas construtivos, questões logísticas, entre outros parâmetros.

Os estudos dos sistemas de lajes ganham importância porque os projetos estruturais representam cerca de 15% a 20% do custo da obra, onde uma redução de cerca de 10% nesse tipo de projeto, pode gerar uma economia de 2% no custo total (COSTA, 1997). Existem no mercado vários sistemas estruturais para construções de lajes em pavimentos de concreto armado, alguns mais onerosos quanto a aquisição, porém que trazem benefícios ao canteiro de obras e que garantem sua maior sustentabilidade. Por exemplo, as lajes pré-moldadas e pré-fabricadas. Assim, uma análise holística e quantitativa se faz necessária, para que a escolha do sistema de laje para uma edificação ocorra de forma confiável e viável.

2.2 Métodos multicritério de apoio a decisão

Nas diversas áreas, inclusive na Engenharia Civil, a tomada de decisão na maioria das vezes ainda está baseada na intuição, os chamados julgamentos intuitivos, nos quais a análise dos vários constituintes do problema não é feita de forma organizada e racional. A relevância de uma metodologia de apoio à tomada de decisão multicritério deriva do fato de que na maioria das situações, não existe apenas um objetivo e sim, são considerados vários pontos de vista, sendo eles, geralmente conflitantes entre si.

O processo de tomada de decisão é muito complexo, sobretudo na construção civil, pois uma decisão envolve diversas alternativas com consequências diferentes e vários critérios que devem ser analisados. De acordo com Almeida (2010), um problema de decisão multicritério consiste numa situação, em que há pelo menos duas alternativas de ação para se escolher, e essa escolha é conduzida pelo desejo de se atender a múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si. Esses objetivos estão associados às consequências da escolha pela alternativa a ser seguida. A esses objetivos são associadas às variáveis que os representam e permitem a avaliação de cada alternativa, com base em cada objetivo.

A construção do modelo multicritério de decisão (MCDA) busca representar algebricamente um cenário a ser analisado (ALMEIDA, 2010). Entre os diversos métodos existentes aplicados às diversas problemáticas, destacam-se os métodos das famílias PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) e ELECTRE (*Elimination and Choice Translating algorithm*) que estabelecem uma relação de sobreclassificação entre as alternativas, que são avaliadas sob o olhar de diversos critérios.

Uma relação de sobreclassificação (*outranking*) é uma relação binária que permite ao decisor avaliar a força do caráter excessivo de uma alternativa *a* sobre uma alternativa *b*, isto é, verifica a “superação” ou “prevalência” de uma alternativa sobre a outra (ALMEIDA, 2013). Essa força aumenta se houver argumentos suficientes (coalizão dos critérios) para confirmar que *a* é pelo menos tão bom como *b*, enquanto não há evidências fortes para recusar essa afirmação. Esses métodos assumem a possibilidade de incomparabilidade na estrutura de preferência do decisor, usando uma relação de *outranking* entre alternativas (ALMEIDA, 2013).

Especificamente em relação ao método utilizado neste trabalho, o PROMETHEE, o seu funcionamento é pautado em duas etapas. A primeira envolve o desenvolvimento de uma relação de sobreclassificação entre as alternativas

consideradas. Isso ocorre por meio de comparações par a par entre os desempenhos das alternativas ($g_i(a)$ e $g_i(b)$, por exemplo) para os critérios (i), onde é estabelecida uma função de preferência que mede a intensidade de preferência de uma alternativa sobre a outra. Assim, se uma alternativa a possui um desempenho superior ao da alternativa b (Equação 1) é atribuído um valor para a função de preferência ($F_i(a, b)$), caso contrário, como mostrado na Equação 2, é atribuído um outro valor para essa função, conforme o critério considerado pela análise. No caso mais simples considerando o critério usual, a função de preferência pode assumir os valores de 1 e 0, como apresentado nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$g_i(a) - g_i(b) > 0 \rightarrow F_i(a, b) = 1 \quad (1)$$

$$g_i(a) - g_i(b) \leq 0 \rightarrow F_i(a, b) = 0 \quad (2)$$

A segunda etapa envolve a exploração dessa relação desenvolvida para escolher as melhores alternativas (α problemática), classificá-las em grupos homogêneos (problemática β) ou para classificá-los entre os menos preferidos (problemático γ) (ZOPOUNIDIS, 1999). Nesse caso, são comparados os valores obtidos pela agregação das funções de preferências, para estabelecer um fluxo de dominância entre as alternativas, maiores detalhes serão destacados na metodologia deste trabalho.

Aplicações de modelos multicritério de apoio à decisão na construção civil vem ganhando espaço em decisões técnicas e gerenciais, tais como seleção de *portfólio* de projetos para direcionar empreendimentos da indústria civil (SILVA *et al.*, 2015), seleção de empreiteiros e classificação de empresas em processo licitatório, seleção de sistemas estruturais de laje (BOLLELLA *et al.*, 2013), outras aplicações podem ser vistas no Quadro 1. Como se percebe, existe a aplicação e a análise dos métodos multicritério para seleção de fundações, sistemas construtivos, sistemas estruturais de lajes, bem como na dosagem de materiais de construção e pontes.

Quadro 1 – Estudos anteriores que utilizaram métodos multicritério em problemas da construção civil

Autores	Objetivos	Técnicas utilizadas	Principais resultados
Cruz <i>et al.</i> (2019)	Aplicação de um método multicritério para selecionar alternativas de fundações profundas do tipo estaca em projetos de edifícios em centros urbanos.	Método AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)	Foi identificado que a estaca pré-moldada de concreto foi a recomendada para o sistema de fundações profundas do edifício analisado, sendo assim, este estudo de caso apresenta um resultado esperado e coerente, constatando a efetividade dessa ferramenta de apoio à tomada de decisão.
Moghtadernejad <i>et al.</i> (2019)	Selecionar tipos de fachadas otimizadas para edifícios considerando vários critérios e a interdependência existente entre eles.	Integrais de Choquet, um método de tomada de decisão que usa medidas difusas para modelar a	A abordagem se mostrou viável, sobretudo, para estimar as medidas nebulosas quando não há preferências iniciais ou conhecimento sobre a

Autores	Objetivos	Técnicas utilizadas	Principais resultados
		importância de cada subconjunto ou combinação de critérios.	classificação das alternativas. A metodologia se mostrou complexa numericamente, sendo necessário o desenvolvimento de algoritmos para a implementação computacional do método.
Ighravwe <i>et al.</i> (2019)	Selecionar uma estratégia de manutenção adequada para edifícios públicos.	Utilização integrada dos métodos multicritérios: SWARA (<i>weight assessment ratio analysis</i>), WASPAS (<i>weighted additive sum product assessment</i>), o FAD (<i>fuzzy axiomatic design</i>) e o ARAS (<i>additive ratio assessment</i>).	O método apresentou-se adequado para a seleção de manutenções. Para critérios ambientais e sociais, as estratégias de manutenção mais adequadas foram estratégias baseadas em condições situacionais e manutenção preventiva, respectivamente.
Zavadskas <i>et al.</i> (2017)	Criar um modelo baseado em métodos de apoio à decisão para seleção integrada de materiais e tipos de construção de uma residência familiar. Levando em consideração os parâmetros técnicos específicos relacionados aos materiais de construção: custo, ponte térmica, capacidade de carga, a seleção externa de material de acordo com a localização, desempenho ambiental, durabilidade e peso.	Metodologia integrada envolvendo: (1) método SWARA para obtenção dos pesos dos critérios por meio de uma classificação estabelecida pelos especialistas; (2) método multicritério neutrosófico (MULTIMOORA-SVNS) para classificar as construções.	A metodologia adotada apresentou-se adequada a problemática, com a análise de sensibilidade mostrando a sua confiabilidade. A capacidade de suporte das paredes, durabilidade e potencial de respeito ao meio ambiente tiveram grande impacto na escolha final do tipo de construção.
Costa (2017)	Avaliar os sistemas construtivos pré-fabricados para fins habitacionais que atendam às especificações previstas em norma.	Método PROMETHEE II (<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>).	O sistema construtivo em paredes de concreto armado moldadas no local, seguido do sistema de paredes, moldadas no local, constituídas por componentes de poliestireno expandido (EPS), aço e argamassa, microconcreto ou concreto, também conhecido como sistema monolítico, mostraram-se boas alternativas para o desenvolvimento de projetos imobiliários na região.
Turskis <i>et al.</i> (2016)	Apresentar um modelo multicritério para selecionar o tipo	WASPAS-G (soma agregada ponderada avaliação) e o AHP.	O modelo de solução do problema sugerido ofereceu maior precisão de previsão, além de procedimentos mais

Autores	Objetivos	Técnicas utilizadas	Principais resultados
	fundação de uma casa térrea.		simples e claros para analisar alternativas de construção de fundações e classificação dos atributos em termos de nível de significância.
Silva <i>et al.</i> (2015)	Discutir combinações de tipos de cimento (CPII-Z-32: com adição de pozolana, CP III-40: com adição de escória e CPIV-32: com adição de pozolana), buscando obter o de maior capacidade de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de cloretos.	Método AHP	A aplicação do AHP mostrou-se eficaz na escolha do tipo de cimento, gerando a constatação que o cimento CP III-40 apresentou o melhor desempenho entre os cimentos avaliados.
Bollella <i>et al.</i> (2013)	Utilização do método <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) para tomada de decisão multicritério para seleção de sistemas de lajes.	Método AHP	Tendo como objetivo a escolha de uma laje, dentre 4 tipos de lajes, hierarquizou-se 5 critérios, tendo como o mais relevante o critério de Tempo de execução. Sendo assim, a melhor alternativa foi a laje mista – <i>Steel Deck</i> .
Pan (2008)	Seleção de métodos construtivos de pontes.	Método <i>Fuzzy</i> AHP	A abordagem desenvolvida apresentou eficaz na captura das incertezas existentes na escolha do método construtivo de pontes.

Fonte: Autores (2021).

Entre os trabalhos identificados na literatura sobre o tema, destaca-se a aplicabilidade dos métodos multicritério na escolha do tipo de fundação de uma edificação, como mostrado por Turskis *et al.* (2016), já que esse processo é complexo e depende de parâmetros do solo que definirão a resistência do mesmo, da carga a ser suportada, assim como características construtivas das soluções disponíveis e da economia a ser alcançada.

A escolha de um sistema de laje, como realizado por Bollella *et al.* (2013), também se revelou como uma outra possibilidade de utilização dos métodos, tendo em vista que essa escolha envolve sua interligação com o sistema estrutural da edificação e a sua adequação aos estados-limites de serviço (ELS) e último (ELU). Outro trabalho na mesma linha do anterior é o de Pan (2008) que utilizou um método multicritério difuso para contornar as incertezas no processo de escolha de um tipo de ponte em Taiwan. Ressalta-se que esses trabalhos utilizaram os métodos multicritério respaldados na *expertise* e experiência dos engenheiros, do resultado de ensaios experimentais e de análises específicas para o caso que analisaram.

No que tange aos métodos utilizados, percebe-se a ampla utilização do método AHP (CRUZ *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2015; BOLLELLA *et al.*, 2013; MATTANA *et al.*, 2012; PAN, 2008) dada sua simplicidade e possibilidade de verificação do grau de consistência, no entanto, como já alertado por Almeida (2013), nesse método tem-se o problema de inversão de ordem das alternativas. O método PROMETHEE também

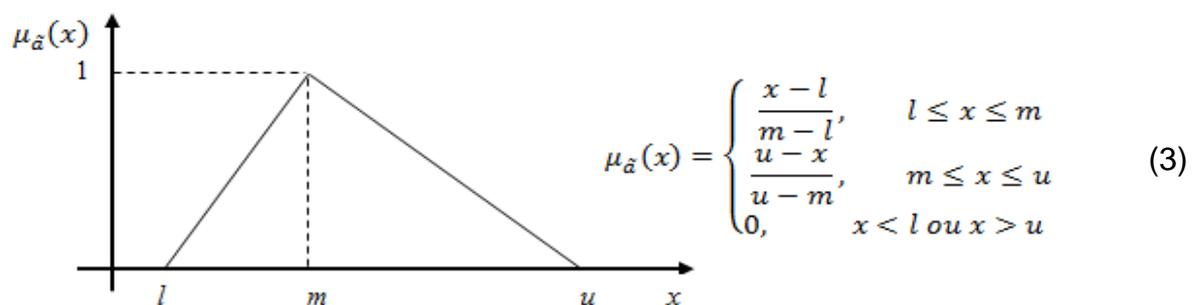
vem sendo utilizado (COSTA, 2017; SILVA *et al.*, 2015) e apresentando resultados satisfatórios e adequados as problemáticas investigadas. Métodos híbridos também estão sendo utilizados para uma análise mais robusta e para contornar pontos negativos das técnicas e agregar os ganhos dos métodos (MOGHTADERNEJAD *et al.*, 2019; IGHRAVWE *et al.*, 2019; ZAVADSKAS *et al.*, 2017). Pelos estudos identificados nesta pesquisa percebe-se a aplicabilidade dos métodos multicritério em problemas ligados à construção civil, bem como o uso de métodos híbridos e da lógica *fuzzy* para contorno de incertezas dos dados.

2.3 Lógica Fuzzy

A lógica tradicional dos conjuntos matemáticos tem como essência a dicotomia da pertinência dos elementos a que pertence ou não pertence a um determinado conjunto, só existindo essas possibilidades. Porém, no mundo real existem situações que, na ausência de informações completas, tornam-se ambíguas e / ou vagas, não sendo contornadas pela lógica matemática tradicional. Esse é frequentemente o caso no uso de termos linguísticos, em que termos como "bom", "satisfatório" e "ruim" podem ser usados para avaliação (SILVA *et al.*, 2014; AQUINO *et al.*, 2019).

Em 1965, Zadeh publica o artigo *Fuzzy Sets*, aproximando o rigor matemático às imprecisões do mundo real. A lógica *fuzzy*, como é chamada, é uma extensão da lógica booleana e permite que um elemento venha pertencer a um ou mais conjuntos, ou não, nos mais variados graus (ZADEH, 1965). Sendo assim, essa lógica é definida como um conjunto *fuzzy* A, do conjunto universal U, por meio da função de pertinência $\mu_A(x)$, com todos os seus valores dentro de um intervalo [0,1] (SILVA *et al.*, 2014). Neste trabalho utilizou-se do número triangular *fuzzy*, considerado como \tilde{a}_{ij} é um número triangular *fuzzy* tal que $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$. Esse número é dado pela função de pertinência $\mu_{\tilde{a}}(x)$ que obedece às propriedades descritas abaixo (Equação 3 e Figura 1).

Figura 1 – Representação de um número *fuzzy* triangular



Fonte: Aquino *et al.* (2019).

Onde m é o valor modal do julgamento do critério i com relação ao critério j , l o seu menor valor possível e u o seu valor máximo (ZADEH, 1965).

2.4 Programação Linear

A programação linear é uma das técnicas mais utilizadas em problemas de Pesquisa Operacional que envolvem otimização (BELFIORE; FÁVERO, 2012). Trata-

se de um método científico de tomada de decisão que descreve um sistema organizado através de um modelo matemático composto por uma função-objetivo e um conjunto de restrições técnicas, representadas por um grupo de funções lineares (HILLIER; FREDERICK, 2006; SOUSA *et al.*, 2005).

A função-objetivo mede a eficiência e o desempenho do sistema. Enquanto que as restrições garantem que essas soluções estejam de acordo com as limitações técnicas impostas pelo próprio sistema, que devem ser obrigatoriamente satisfeitas. Existem, ainda, outras restrições que exigem a não negatividade das variáveis de decisão, o que deverá ocorrer sempre que a técnica de abordagem for a de programação linear (TAHA, 2008). O modelo padrão de um problema de otimização via programação linear é representado por uma função de otimização destinada a maximização ou minimização (Equação 4), sendo essa sujeito a restrições (Equações 5 a 8).

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k \quad (4)$$

Sujeita a:

$$c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1k}x_k \leq ou = ou \geq b_1 \quad (5)$$

$$c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2k}x_k \leq ou = ou \geq b_2 \quad (6)$$

$$c_{n1}x_1 + c_{n2}x_2 + \dots + c_{nk}x_k \leq ou = ou \geq b_n \quad (7)$$

$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (8)$$

No modelo matemático mostrado pelas equações anteriores, deve-se interpretar que x_i são variáveis de decisão, que devem ser todas contínuas, ou seja, devem assumir quaisquer valores em um intervalo de números reais; a_i são os coeficientes ou parâmetros da função-objetivo; c_{ij} são os coeficientes das restrições, que podem ser expressas por equações ou inequações lineares; e o b_i são os limites das restrições.

Em um problema de programação linear, a função-objetivo e as restrições do modelo devem ser lineares, as variáveis de decisão devem ser contínuas e não negativas, e os parâmetros do modelo determinístico, de forma a satisfazer as seguintes hipóteses: (i) Proporcionalidade: requer para cada variável de decisão considerada a sua contribuição em relação à função-objetivo e às restrições do modelo seja diretamente proporcional ao valor da variável de decisão; (ii) Aditividade: o valor total da função-objetivo ou de cada função de restrição de um modelo de programação linear é expresso pela soma das contribuições individuais de cada variável de decisão; (iii) Divisibilidade: cada uma das variáveis de decisão podem assumir quaisquer valores não negativos dentro de um intervalo, incluindo valores fracionários, desde que satisfaçam as restrições do modelo; (iv) Certeza: conforme essa hipótese os coeficientes da função-objetivo, os coeficientes das restrições e os termos independentes de um modelo de programação linear são determinísticos (HILLIER; FREDERICK, 2006; BELFIORE; FÁVERO, 2012).

3 METODOLOGIA

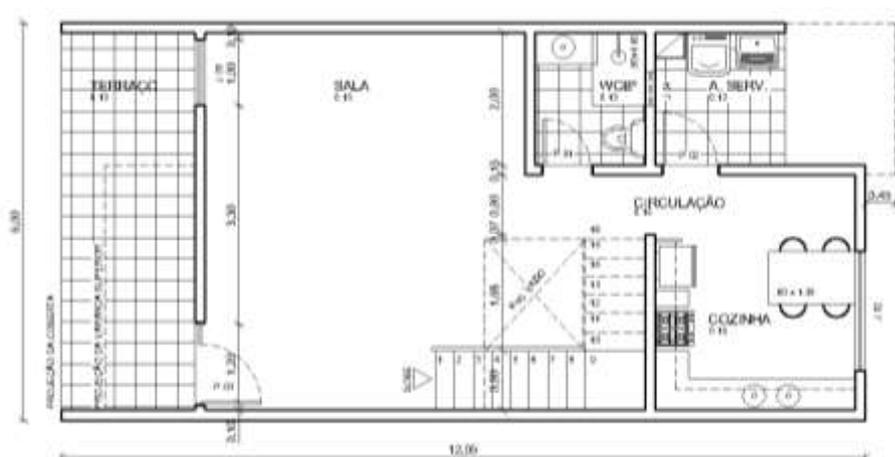
A metodologia de um trabalho científico tem como objetivo explicitar o método utilizado na pesquisa pelo pesquisador, detalhando as etapas e o modo como os dados foram tratados e analisados. Assim, o presente tópico apresenta: os processos

construtivos analisados, as alternativas disponíveis, critérios considerados, as etapas utilizadas para integrar os três métodos utilizados: o *fuzzy Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (Fuzzy SWARA)*, o método multicritério PROMETHEE e a programação linear, com todas as etapas sustentadas no referencial teórico.

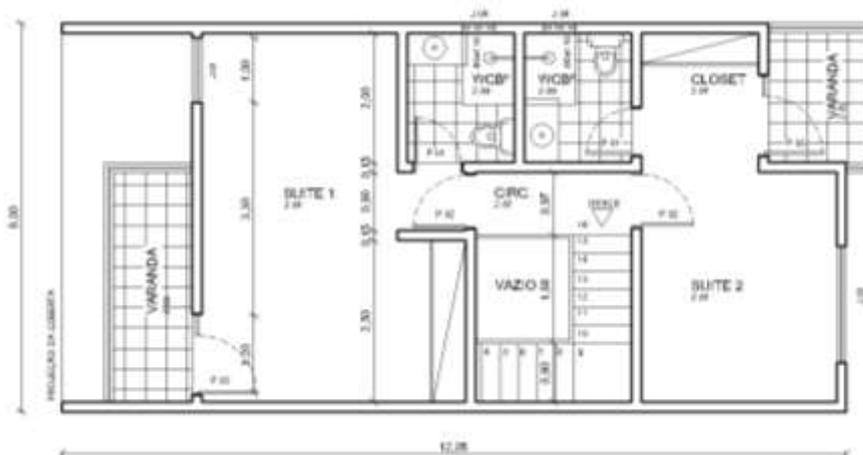
Buscando atingir o objetivo estabelecido, este trabalho pode ser classificado como exploratório e descritivo (LIMA, 2008). A escolha por esta metodologia decorreu da sua capacidade de análise aprofundada em determinados objetos ou situações, permitindo o melhor conhecimento dos processos e das relações estabelecidas entre os elementos existentes (YIN, 2015), sendo considerado dois aspectos, a saber: a natureza do fenômeno investigado e o conhecimento que se pretende alcançar com o presente estudo (MAANEN, 1983; MILLER, 1978).

Ainda, esse estudo também pode ser considerado como pesquisa aplicada por sistematizar um processo de tomada de decisão para escolha dos processos construtivos das etapas de fundação superficial, alvenaria de vedação e laje em um exemplo numérico aplicado para uma edificação familiar com dois pavimentos (térreo e superior) com um total de 143,055 m², conforme as plantas baixas e fachada frontal apresentadas na Figura 2. Para que os objetivos fossem alcançados um conjunto de etapas foram utilizadas, elas estão detalhadas na seção 3.1.

Figura 2 – Plantas baixas da edificação usada na aplicação numérica



(a) Pavimento térreo

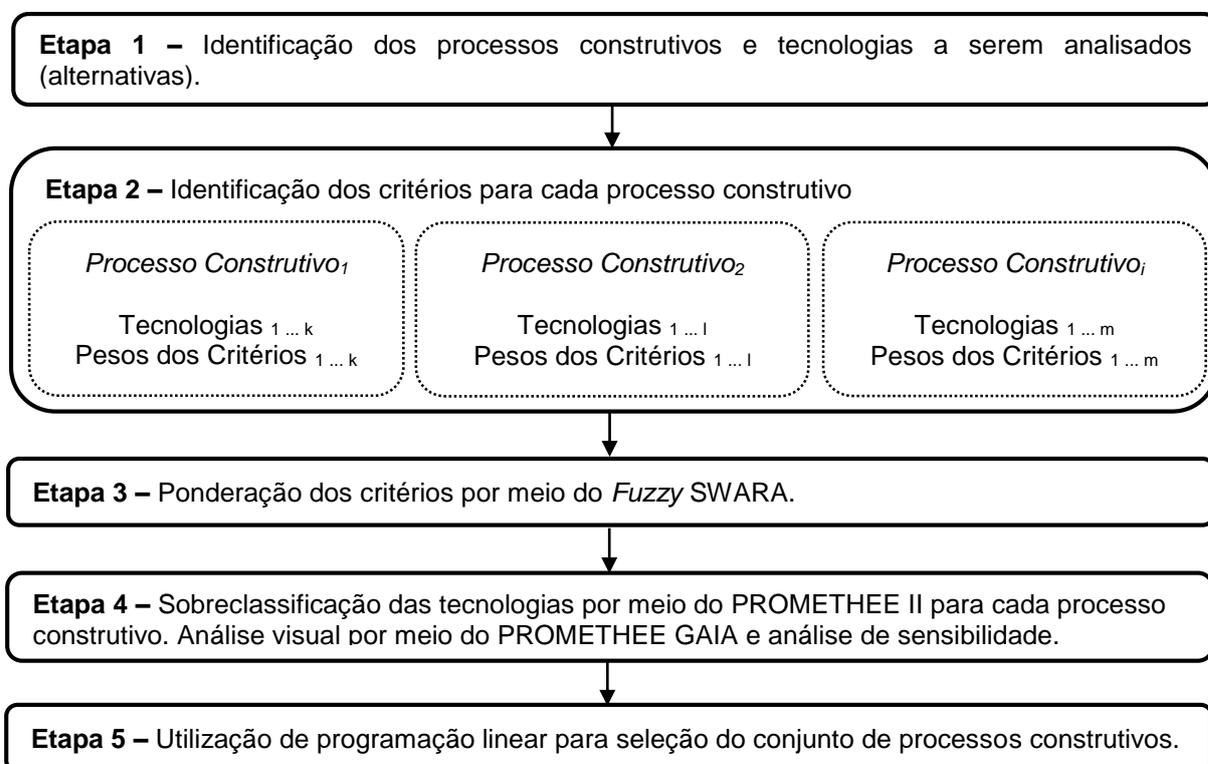


(b) Pavimento superior

3.1 Estratégia de análise dos dados

Como observado em trabalhos pesquisados (Quadro 1) muitas técnicas são agregadas para se obter resultados mais robustos. Assim, as macro etapas necessárias para aplicação do modelo híbrido utilizado nesta pesquisa foram: (i) Escolha dos processos construtivos (alternativas), (ii) Identificação dos critérios junto a literatura para cada processo construtivo, (iii) Estabelecimento do peso de cada critério pelo método *fuzzy* SWARA, (iv) Sobreclassificação das alternativas por meio do método PROMETHEE II e GAIA, e (v) uso de programação linear, para definir um conjunto ótimo de processos. Conforme ilustrado na Figura 3, cinco etapas foram utilizadas para alcançar os objetivos estabelecidos neste trabalho, cada uma está descrita a seguir.

Figura 3 – Etapas da metodologia utilizada neste trabalho.



Fonte: Autores (2021).

Etapa 1: Nesta etapa foram escolhidos os processos construtivos e tecnologias que poderiam ser utilizados na obra, como as alternativas viáveis a serem implementadas. Como esse é um estudo baseado em um exemplo ilustrativo de uma residência familiar foram consideradas as etapas de fundação superficial (partindo do pressuposto de que, a partir de uma sondagem no terreno, o solo apresentou resistência adequada para que uma fundação superficial suportasse as cargas permanentes e temporárias da edificação), alvenaria de vedação e sistema de lajes. Para a fundação as alternativas identificadas foram: blocos de concreto (A1), sapata isolada (A2) e *radier* (A3). Para a alvenaria de vedação as alternativas: bloco cerâmico

(A4) e *drywall* (A5). Por fim, para o sistema de lajes as alternativas utilizadas foram: laje maciça (A6), treliçada com isopor (A7), painel (A8) e treliçada com cerâmica (A9).

Etapa 2: Nesta etapa foram identificados os critérios (Quadros 2 e 3), com base em revisão de literatura e normas técnicas.

Quadro 2 – Critérios utilizados nesta pesquisa

Processo Construtivo	Alternativas	Critérios		
		Código	Descrição	Referências
Fundação superficial	A1 – Bloco A2 – Sapata isolada A3 – <i>Radier</i>	C1	Consumo de concreto (m ³ /m ²)	D'Agostini (2018) Formigoni (2009)
		C2	Taxa de armadura (kg/m ²)	
		C3	Taxa de forma (m ² /m ²)	
		C4	Horas de trabalho (h)	
Alvenaria de vedação	A4 – Bloco cerâmico A5 – <i>Drywall</i>	C5	Estabilidade e resistência estrutural	ABNT NBR 15.575-4 (2013) Aquino <i>et al.</i> (2018)
		C6	Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas	
		C7	Capacidade de combate a incêndio	
		C8	Umidade nas vedações verticais internas	
		C9	Desempenho térmico	
		C10	Desempenho acústico	
		C11	Durabilidade	
		C12	Manutenibilidade	
		C13	Conforto tátil e adaptação ergonômica	
Lajes	A6 – Laje maciça A7 – Laje treliçada com isopor A8 – Laje painel A9 – Laje treliçada com cerâmica	C14	Economia geral do sistema construtivo para a edificação	Santos e Cruz (2013) Bollella <i>et al.</i> (2013)
		C15	Custo de execução por m ²	
		C16	Consumo de concreto (m ³ /m ²)	
		C17	Taxa de armadura (kg/m ²)	
		C18	Taxa de forma (m ² /m ²)	
		C19	Tempo de execução (h)	
		C20	Necessidade de escoramento	

Fonte: Autores (2021).

Quadro 3 – Especificação dos critérios utilizados nesta pesquisa

Processo Construtivo	Critério		
	Cód.	Nome	Especificação
Fundação	C1	Consumo de concreto (m ³ /m ²)	Concreto do elemento de fundação.
	C2	Taxa de armadura (kg/m ²)	Armadura da fundação para resistir aos esforços solicitantes.
	C3	Taxa de forma (m ² /m ²)	Formas em madeira ou metálicas para moldar o concreto fresco e dar forma ao elemento de fundação.
	C4	Horas de trabalho (h)	Horas gastas pelos mestres de obras, pedreiros e auxiliares para a execução da fundação.
Alvenaria	C5	Estabilidade e resistência estrutural	Relaciona-se ao nível de segurança considerando as combinações de ações passíveis de ocorrerem durante a vida útil da edificação habitacional ou do sistema.

Processo Construtivo	Critério			
	Cód.	Nome	Especificação	
Processo Construtivo	C6	Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas	São os deslocamentos verticais e horizontais, fissurações e falhas de execução que impactam no livre funcionamento de elementos e componentes da edificação.	
	C7	Capacidade de combate a incêndio	Refere-se a proteção a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio.	
	C8	Umidade nas vedações verticais internas	Não permitir infiltração de água, através de suas faces, quando em contato com áreas molháveis e molhadas.	
	C9	Desempenho térmico	O sistema de alvenaria deve proporcionar condições térmicas no interior da edificação melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o dia de acordo com a estação climática, e também à zona em que a habitação está localizada.	
	C10	Desempenho acústico	O sistema de alvenaria deve proporcionar isolamento acústico, no que se refere aos ruídos aéreos provenientes do exterior da edificação habitacional, e isolamento acústico adequado entre áreas comuns e privativas.	
	C11	Durabilidade	Manter a capacidade funcional durante a vida útil de projeto.	
	C12	Manutenibilidade	Intervenções periódicas de manutenção para garantir a funcionalidade do elemento.	
	C13	Conforto tátil e adaptação ergonômica	Capacidade do sistema de alvenaria em não prejudicar as atividades normais dos usuários. Não apresentar rugosidades, contundências, depressões ou outras irregularidades nos elementos, componentes, equipamentos e quaisquer acessórios ou partes da edificação.	
	C14	Economia geral do sistema construtivo para a edificação	Economia de tempo, materiais, mão de obra para execução do sistema de alvenaria.	
	C15	Custo de execução por m ²	Custo financeiro da execução do sistema de alvenaria.	
	Laje	C16	Consumo de concreto (m ³ /m ²)	Concreto necessário para compor a estrutura do sistema de laje.
		C17	Taxa de armadura (kg/m ²)	Armadura do sistema de laje para resistir aos esforços solicitantes.
		C18	Taxa de forma (m ² /m ²)	Formas em madeira ou metálicas para moldar o concreto fresco e dar forma ao elemento da laje.
		C19	Tempo de execução (h)	Horas gastas pelos mestres de obras, pedreiros e auxiliares para a execução do sistema.
		C20	Necessidade de escoramento	Elemento de madeira ou metálico responsável por suportar todas as cargas da estrutura de um pavimento enquanto o concreto ainda não atingiu a sua resistência de projeto.

Fonte: Autores (2021).

Etapa 3: Para obtenção dos pesos dos critérios foi utilizado o *fuzzy Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (Fuzzy SWARA)* desenvolvido por Keršulienė *et al.* (2010). A abordagem *fuzzy* foi escolhida por contornar incertezas presente nas escolhas dos indivíduos, por meio do uso de termos linguísticos que se adequam ao seu universo, sobretudo por essa escolha ocorrer no momento do planejamento da

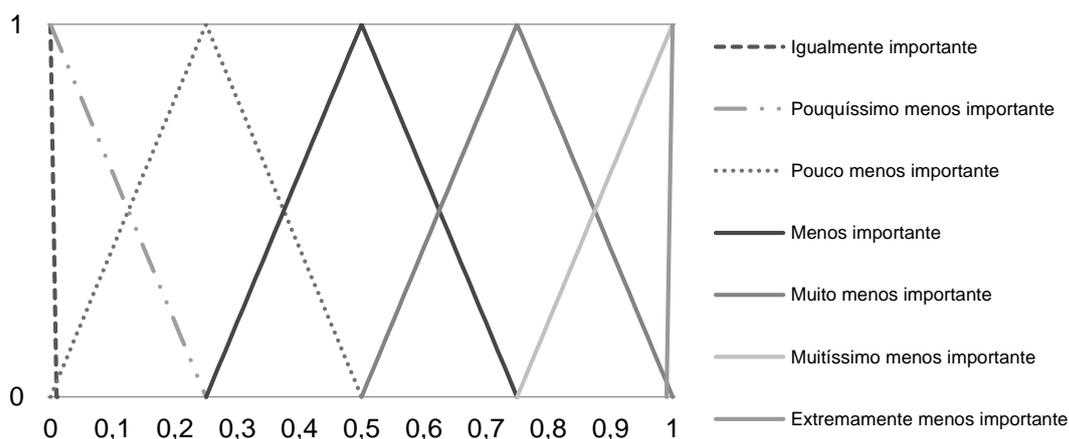
obra, onde não se tem muitas informações para que decisões totalmente assertivas sejam tomadas. No método tradicional desenvolvido, o SWARA, cada especialista pode determinar a importância de cada critério e classificá-los do primeiro ao último. Com base em informações, experiências e conhecimentos implícitos dos especialistas, o critério mais significativo é dado ao primeiro posto como o melhor e o critério mais trivial é dado ao último posto (AGHDAIE *et al.*, 2013).

Diferentemente dos métodos que realizam comparações relativas, como o AHP e ANP, neste método o número de comparações necessárias é significativamente menor, o que é mais benéfico para coletar e organizar dados de especialistas (AGHDAIE *et al.*, 2013), além de estar livre dos problemas clássicos do AHP, como a reversão de ordem. O SWARA e métodos híbridos vêm sendo bastante utilizados, como observado nos trabalhos de Ighravwe *et al.* (2019) e Zavadskas *et al.* (2017). Nesses termos, para utilização do *fuzzy* SWARA foram seguidas algumas subetapas, a saber:

Etapa 3.1 - Organização dos critérios em ordem decrescente. O arranjo depende dos significados esperados pelos critérios, que nesse trabalho essa etapa foi realizada por meio de revisão de literatura, com priorização de itens mais onerosos, como concreto e aço.

Etapa 3.2 - Avaliação da importância comparativa do valor médio (s_j). Isso envolve a determinação da importância relativa do critério j em relação ao critério anterior ($j-1$). Neste estudo, a importância comparativa dos critérios do processo construtivo para a edificação analisada foi expressa em termos linguísticos (Figura 4) dada a sua simplicidade de aplicação e entendimento. Os termos linguísticos foram usados para comparar a importância de um critério com outro. Por exemplo, “qual a importância do critério x para a eficiência do processo construtivo i em relação ao critério anterior?”.

Figura 4 – Escala dos termos linguísticos utilizados nesta pesquisa



Fonte: Adaptado de Mavi, Goh e Zarbakhshnia (2017) e Lau *et al.* (2003).

Etapa 3.3 – Utilização do processo de *defuzzificação*, que segundo Simões e Shaw (2007), consiste em transformar o valor da variável linguística processada pela lógica *fuzzy* em um valor discreto, ou seja, visa converter o valor *fuzzy* referente à saída da inferência para o universo dos números reais (\mathbb{R}), haja vista que algumas

aplicações do número *fuzzy* necessitem desse tratamento. Entre os vários métodos existentes para a realização deste processo, nesta pesquisa utilizou-se a Equação 9 para tal finalidade, por ser de fácil aplicação na construção civil.

$$x_{ij} = \frac{(l_1 + 4m_1 + u_1)}{6} \quad (9)$$

Etapa 3.4 - Avaliação do coeficiente (k_{ij}) usando a Equação 10.

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } j = 1 \\ x_{ij} + 1, & \text{se } j > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Etapa 3.5 - Avaliação do peso recalculado (q_{ij}) usando a Equação 11.

$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } j = 1 \\ \frac{q_{ij-1}}{k_{ij}}, & \text{se } j > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Etapa 3.6 - Determinação dos pesos relativos (w_{ij}) dos critérios de avaliação usando a Equação 12. A soma dos pesos para todos os critérios deve ser igual a 1.

$$w_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij}} \quad (12)$$

Etapa 4: Após estabelecer os pesos dos critérios por meio do método *fuzzy* SWARA, cada processo construtivo foi avaliado por meio de revisão de literatura, a luz dos critérios analisados (Quadros 2 e 3). Para isso o método multicritério PROMETHEE II foi utilizado por ser método de racionalidade não compensatória, ou seja, uma alternativa com péssima avaliação em um critério não será compensada por uma excelente avaliação em outro critério. A natureza não-compensatória é importante devido à natureza dos critérios utilizados, pois esse método reduz a possibilidade de os dados serem dispersos (FISHBURN, 1976). Além do mais, esse método foi utilizado nesta etapa por se adequar ao objetivo que é avaliar o fluxo de dominância entre as alternativas analisadas e por ser adequado à seleção conjunta.

Dessa forma, foi construída uma matriz de decisão para cada processo construtivo, que serviu de entrada para o método PROMETHEE II. Para a obtenção do grau de sobreclassificação foi utilizada a Equação 13. As preferências foram modeladas pelo critério usual, onde não há um parâmetro definido.

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n p_i F_i(a, b) \quad (13)$$

Onde:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (14)$$

Onde: $F_i(a, b)$: é definido pela função das diferenças no nível de performance de duas alternativas para um determinado critério, cujo valor dependerá do formado da função preferencial, que nesta pesquisa foi o critério usual, em que, por exemplo, uma alternativa a , para um critério i , é mais bem avaliada pelo decisor do que a alternativa b , para o mesmo critério i , tem-se um $F_i(a, b) = 1$, caso contrário, tem-se $F_i(a, b) = 0$ (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986);

$\pi(a, b)$: é o grau de sobreclassificação de uma alternativa em relação a uma alternativa considerando todos os critérios (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986);

p_i : o peso do critério i (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986).

Nesta etapa, foi realizada ainda a exploração da relação de sobreclassificação entre as alternativas, por meio do cálculo de dois indicadores, o fluxo de sobreclassificação de saída, Equação 15, e o fluxo de sobreclassificação de entrada, Equação 16. Em outras palavras, nesta etapa são geradas duas pré-ordens, uma decrescente (com os fluxos de entrada ϕ^-) e uma crescente (com os fluxos de saída ϕ^+), a partir da qual é gerada uma pré-ordem parcial, que leva em consideração as relações de incomparabilidade.

$$\phi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (15)$$

$$\phi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(b, a) \quad (16)$$

O fluxo positivo indica o quanto uma alternativa sobreclassifica todas as outras, quanto maior o seu valor, mais bem avaliada é a alternativa. Por outro lado, o fluxo negativo indica o quanto uma alternativa é sobreclassificada pelas demais, quanto menor o seu valor, mais bem avaliada é a alternativa. Em seguida foi gerada uma pré-ordem completa a partir do fluxo líquido de sobreclassificação ($\phi(a)$). Esse foi dado por meio da Equação 17.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (17)$$

O fluxo líquido indica o desempenho de uma alternativa diante das demais, por exemplo, entre duas alternativas a e b , quando $\phi(a) > \phi(b)$ a alternativa a sobreclassifica a alternativa b , quando $\phi(a) = \phi(b)$ as alternativas são indiferentes e, por fim, quando $\phi(a) < \phi(b)$, a alternativa a é sobreclassificada pela alternativa b .

Após a obtenção do fluxo líquido, os mesmos foram representados graficamente e interpretados geometricamente por meio do PROMETHEE GAIA (*Graphical Analysis for Interactive Assistance*) (MARESCHAL; BRANS, 1988; HAYES *et al.*, 2009). Em seguida foi realizado a análise de sensibilidade para verificar se as mudanças nos pesos dos critérios impactam no ordenamento dos sistemas construtivos estabelecido pelo PROMETHEE II, visando evitar o problema de reversão de ordem.

Etapa 5: Após a obtenção dos fluxos de sobreclassificação por meio do PROMETHEE II (Etapa 4) foi realizada uma transformação de escala do fluxo líquido, evitando valores negativos, por meio da adição do fluxo mínimo e de um termo de adicional, $\varepsilon = 0,05$, para que os valores não fossem iguais a zero, gerando um fluxo líquido adaptado ($\phi^{(a)}$), conforme demonstrado em Almeida e Vestchera (2012). Desta forma, o fluxo líquido utilizado foi obtido pela Equação 18.

$$\phi^{(a)} = \phi(a) + |\min_i(\phi_{(a_i)})| + \varepsilon \quad (18)$$

Em seguida, foram estimadas as relações entre os processos construtivos (k), seguindo a sua ordem de execução (fundação, alvenaria e laje, respectivamente), por meio de uma escala de 0 a 1,5, que vai de uma menor sinergia entre os processos construtivos até uma maior sinergia (1,5), considerando construtibilidade e restrições técnicas, obtido, neste trabalho, pelo valor proporcional ao peso próprio do elemento a ser suportado. Essa sinergia foi multiplicada pelo fluxo líquido calculado pela Equação 18 e as relações foram estabelecidas, conforme a Figura 5.

Com o processo estruturado, a programação linear foi aplicada o problema do caminho crítico, um caso especial do problema de rede, que tem como objetivo achar a rota que unem os processos (nós) que maximizam o fluxo de valor no processo construtivo (sinergia do processo com o fluxo líquido) de forma otimizada. Assim, com base em Lachtermacher (2009), a modelagem do problema se deu conforme as Equações 19 a 30.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & k_1\phi_1x_{01} + k_2\phi_2x_{02} + k_3\phi_3x_{03} + k_4\phi_4x_{14} + k_5\phi_5x_{15} + k_6\phi_4x_{24} + k_7\phi_5x_{25} \\ & + k_8\phi_4x_{34} + k_9\phi_5x_{35} + k_{10}\phi_6x_{46} + k_{11}\phi_6x_{56} + k_{12}\phi_7x_{47} + k_{13}\phi_8x_{48} \\ & + k_{14}\phi_9x_{49} + k_{15}\phi_7x_{57} + k_{16}\phi_8x_{58} + k_{17}\phi_9x_{59} + k_{18}x_{610} + k_{19}x_{710} \\ & + k_{810}x_{20} + k_{21}x_{910} \end{aligned} \quad (19)$$

$$S. A.: -x_{01} - x_{02} - x_{03} = -1 \quad (20)$$

$$x_{01} - x_{14} - x_{15} = 0 \quad (21)$$

$$x_{02} - x_{24} - x_{25} = 0 \quad (22)$$

$$x_{03} - x_{34} - x_{35} = 0 \quad (23)$$

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} - x_{46} - x_{47} - x_{48} - x_{49} = 0 \quad (24)$$

$$x_{15} + x_{25} + x_{34} - x_{56} - x_{57} - x_{58} - x_{59} = 0 \quad (25)$$

$$x_{46} + x_{56} - x_{610} = 0 \quad (26)$$

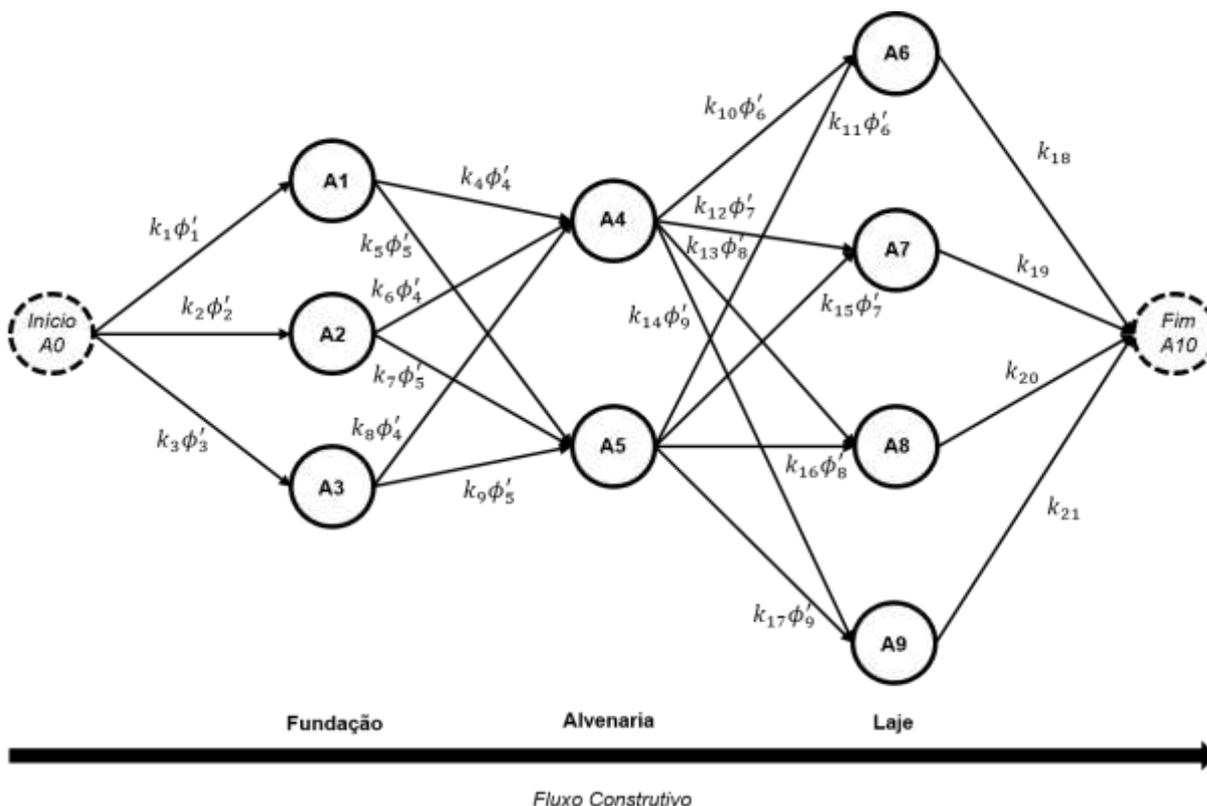
$$x_{47} + x_{57} - x_{710} = 0 \quad (27)$$

$$x_{48} + x_{58} - x_{810} = 0 \quad (28)$$

$$x_{49} + x_{59} - x_{910} = 0 \quad (29)$$

$$x_{610} + x_{710} + x_{810} + x_{910} = 1 \quad (30)$$

Figura 5 – Estruturação considerada para os processos construtivos analisados.



Fonte: Autores (2021).

Onde: k = sinergia estabelecida entre os processos construtivos;

ϕ' = fluxo líquido ajustado;

x = variáveis de decisão presente em cada vértice do grafo da Figura 5, trata-se de uma variável binária, onde o valor 1 indica que o trecho deve ser percorrido, caso contrário, 0, representando todas as combinações possíveis entre os processos construtivos, consoante com o que foi modelado na Figura 5.

As restrições utilizadas, Equações 20 a 30, foram baseadas no estabelecimento de fluxo de entrada e saída igual a zero nas camadas intermediárias, enquanto na entrada e saída são iguais a 1 (um). Os valores para k_1 , k_2 e k_3 foram estabelecidos iguais 1, pois a escolha inicial do tipo de fundação superficial foi baseado apenas nos resultados obtidos pelo PROMETHEE. Esse artifício para modelagem do problema também foi utilizado após as alternativas do sistema de lajes, k_{18} a k_{21} . Além dessas restrições, foi considerado que as variáveis de decisões eram binárias e só podiam assumir valores positivos, e que apenas um único tipo de tecnologia construtiva fosse selecionado para um processo construtivo. Salienta-se que outras restrições poderiam ser utilizadas, conforme o tipo de problema, como o uso de $k = 0$ quando ocorre vetor de uma alternativa na rede.

Para o processamento dos dados foram utilizados o Microsoft Excel 2013® (*Fuzzy SWARA* e programação linear do problema de rede com uso do *Solver*) e o *software* Visual PROMETHEE® *Academic* versão 1.4.0.0 (PROMETHEE II e PROMETHEE GAIA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa, por meio da aplicação numérica do modelo desenvolvido na etapa anterior para apoiar o processo de escolha conjunta dos tipos de fundações, alvenaria de vedação e lajes para uma edificação familiar. Partindo destas considerações, os resultados encontram-se distribuídos de acordo com as seguintes etapas: (i) obtenção dos pesos dos critérios por meio do método *Fuzzy SWARA*; (ii) avaliação de cada processo construtivo (fundação, alvenaria de vedação e laje) frente aos critérios obtidos para obtenção de uma classificação das alternativas para cada processo; (iii) formação de um conjunto ótimo composto pelos processos construtivos que maximizem valor dos processos. Todas estas etapas foram realizadas de acordo com os procedimentos metodológicos propostos e descritos no tópico anterior.

4.1 Obtenção dos pesos dos critérios

Os pesos relativos dos critérios foram obtidos por meio do método *Fuzzy SWARA*, que se mostrou adequado e de fácil aplicação, para cada processo construtivo. Para a seleção das fundações superficiais os itens de maior importância estavam relacionados aos materiais empregados, aço e concreto, que são uns dos itens mais onerosos para a construção civil. A mão de obra também apresentou um peso significativo, ocupando a terceira posição no *ranking*. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 4 e as memórias de cálculo nos Apêndices 1 a 3.

Quadro 4 – Pesos dos critérios obtidos por meio do *Fuzzy SWARA*

Processo Construtivo	Critério	Avaliação do peso recalculado (q_{ij})	Pesos relativos (w_{ij})
Fundação Superficial	C2 - Taxa de armadura	1,000	0,305
	C1 - Consumo de concreto	0,960	0,293
	C4 - Horas de trabalho	0,7432	0,227
	C3 - Taxa de forma	0,5754	0,176
Alvenaria de Vedação	C15 - Custo de execução por m ²	1,000	0,120
	C14 - Economia de material e mão-de-obra	1,000	0,120
	C5 - Estabilidade e resistência estrutural	1,000	0,120
	C6 - Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas	0,960	0,116
	C9 - Desempenho térmico	0,922	0,111
	C10 - Desempenho acústico	0,885	0,107
	C11 - Durabilidade	0,708	0,085
	C12 - Manutenibilidade	0,472	0,057
	C13 - Conforto tátil e adaptação ergonômica	0,472	0,057
Lajes	C8 - Umidade nas vedações verticais internas	0,453	0,055
	C7 - Capacidade de combate a incêndio	0,435	0,052
	C17 - Taxa de armadura	1,000	0,239
	C16 - Consumo de concreto	1,000	0,239
	C19 - Tempo de execução	0,800	0,191
	C18 - Taxa de forma	0,768	0,184
	C20 - Necessidade de escoramento	0,614	0,147

Fonte: Autores (2021).

Com relação a alvenaria de vedação, critérios econômicos (como o custo e a economia de materiais) e critérios técnicos básicos (estabilidade e deslocamentos) obtiveram importâncias próximas, mostrando que a segurança estrutural da vedação é importante, assim como seu custo de execução. Por outro lado, critérios relacionados ao desempenho do sistema com relação ao combate a incêndio, patologias, adaptação ergonômica e a manutenção foram os itens menos valorados. No sistema de lajes, os pesos obtidos foram mais homogêneos, com os materiais básicos, armação e concreto, apresentando maior importância, assim como a mão de obra, que está relacionada ao tempo de execução.

4.2 Avaliação multicritérios dos processos construtivos

4.2.1 Processo construtivo de fundação superficial

O processo construtivo de fundação superficial foi avaliado a partir de uma escala de 1 (baixo uso) a 5 (alto uso), que buscou refletir o uso de insumos, materiais e mão de obra de cada alternativa, com base na literatura e em trabalhos de análise comparativa. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 5.

Pela matriz de decisão, representada no Quadro 5, identifica-se uma avaliação muito próxima entre as alternativas, sobretudo entre o *radier* e o bloco de concreto, com esse último sendo bem avaliado no critério relacionado a armação, tendo em vista que esse item é dispensável, com o concreto resistindo as tensões de tração e compressão. A sapata isolada não obteve uma avaliação tão boa para a edificação em análise, apesar de ser um tipo de estrutura bastante usada.

Quadro 5 – Matriz de decisão para aplicação do método PROMETHEE II – fundação superficial

Alternativas /Critérios	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
Pesos	0,293	0,305	0,176	0,227
Objetivo	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar
A1	4	1	2	3
A2	3	4	3	4
A3	3	3	2	3

Legenda: (1) Utilização muito baixa; (2) Utilização baixa; (3) Utilização média; (4) Utilização alta; (5) Utilização muito alta.

Fonte: Autores (2021).

A sobreclassificação obtida por meio do método PROMETHEE II estão apresentadas no Quadro 6 e a representação gráfica dos resultados obtidos pelo PROMETHEE GAIA na Figura 6.

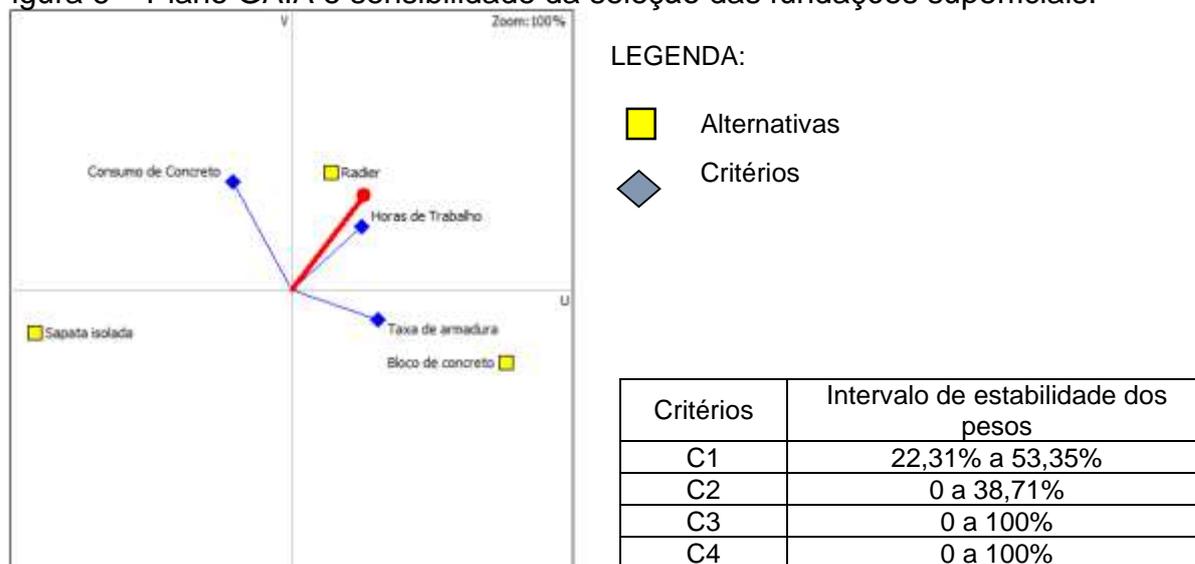
Quadro 6 – Sobreclassificação das fundações superficiais analisadas

Alternativas	Fluxo Positivo (ϕ^+)	Fluxo Negativo (ϕ^-)	Fluxo líquido (ϕ)	Sobreclassificação
A1	0,5060	0,2927	0,2133	2º
A2	0,1464	0,7073	-0,5609	3º
A3	0,5000	0,1523	0,3477	1º

Fonte: Autores (2021).

Pelos resultados, a alternativa mais bem classificada foi o *radier* (A3), seguido do bloco em concreto (A2) e pela sapata isolada (A1), respectivamente. Como última alternativa (A4) obteve uma baixa avaliação em muitos critérios, o seu fluxo negativo excedeu em muito o fluxo positivo, gerando um fluxo líquido negativo. Assim, o *radier* seria a alternativa a ser recomendada, considerando fatores como consumo de matéria e mão-de-obra, pois a ausência de uma série de serviços que não são necessários no *radier* é a diferença que garante essa vantagem, onde não é necessário fazer piso, nem vigas baldrame, nem gastar tempo com escavação e reaterro e, economizando em área de formas de madeira para concretagem também (FORMIGONI, 2009).

Figura 6 – Plano GAIA e sensibilidade da seleção das fundações superficiais.



Fonte: Autores (2021).

Após a obtenção da sobreclassificação dos tipos de fundações superficiais, foi realizada a representação bidimensional do problema multicritério, proporcionando informação relativa às alternativas, critérios e pesos dos critérios. Obteve-se um nível de qualidade 100%, o que significa que os resultados são confiáveis. Por meio da Figura 6 identificou-se que todas as alternativas não são similares, por estarem localizadas distantes uma das outras. A mesma coisa ocorre com os critérios, não havendo muita relação entre eles, mas possuem uma influência semelhante na ordenação das alternativas. Buscando verificar o impacto na análise (especificamente no fluxo líquido do método PROMETHEE II) ao modificar os pesos dos critérios, foi realizada a análise de sensibilidade. No geral, os critérios apresentaram estabilidade, com mudanças nos critérios C3 e C4 não alterando a sobreclassificação das alternativas. Os demais critérios apresentaram estabilidade para mudanças nos pesos de cerca de 30%, com os resultados obtidos apresentados no Apêndice 4.

4.2.2 Processo construtivo de alvenaria de vedação

A escolha do processo construtivo de alvenaria de vedação foi baseada no desempenho das alternativas em uma escala de 1 a 5, que vai de baixo a alto desempenho, conforme Aquino *et al.* (2018). Com base na matriz de decisão, Quadro

7, nos critérios C5, C6, C7, C8 e C12, ambos os sistemas apresentam avaliações iguais. O sistema *drywall* (A5) apresentou as melhores avaliações nos itens relacionados ao desempenho térmico, desempenho acústico, no conforto tátil, adaptação ergonômica e na economia de materiais que são os seus pontos positivos. Enquanto a alvenaria convencional de bloco cerâmico (A4) apresentou desempenho superior nas questões relacionadas à durabilidade e no custo (esse último obtido no SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, para o mês de maio de 2020, em Pernambuco).

Quadro 7 – Matriz de decisão para aplicação do método PROMETHEE II – Alvenaria de Vedação

Alternativas / Critérios	Critérios										
	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
Pesos	0,120	0,116	0,052	0,055	0,111	0,107	0,085	0,057	0,057	0,120	0,120
Objetivo	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Mín
A4	3	3	4	3	2	2	5	4	2	2	60,57
A5	3	3	4	3	4	4	4	4	5	5	130,47

Legenda: (1) Desempenho muito baixo; (2) Desempenho baixo; (3) Desempenho médio; (4) Desempenho alto; (5) Desempenho muito alto.

Fonte: Autores (2021).

Apesar do custo mais elevado, cerca de 115% superior ao sistema de alvenaria em blocos cerâmicos, o sistema mais bem classificado foi o *drywall* (conforme o Quadro 8). Assim, um dos pontos a favor do uso do *drywall* é o fato do sistema de alvenaria de blocos cerâmicos requerer chapisco e emboço antes da pintura, o que aumenta ainda mais o consumo de mão de obra e impacta no prazo, já que cada uma dessas etapas de acabamento requer um tempo de cura. As paredes de gesso acartonado, por sua vez, podem ser revestidas diretamente após a instalação. Além do que, esse último resulta em um edifício mais leve e com maior flexibilidade nas plantas, pois o morador pode modificar ambientes com mais facilidade.

Quadro 8 – Sobreclassificação das alvenarias de vedação analisadas

Alternativas	Fluxo Positivo (ϕ^+)	Fluxo Negativo (ϕ^-)	Fluxo líquido (ϕ)	Sobreclassificação
A4	0,2050	0,3950	-0,190	2º
A5	0,3950	0,2050	0,190	1º

Fonte: Autores (2021).

Analisando o plano GAIA desse processo construtivo (Figura 7), que obteve um nível de qualidade 100%, observa-se que as duas alternativas apresentaram um desempenho não homogêneo, com os critérios relacionados ao conforto tátil, ergonomia, economia, desempenho acústico que impulsionaram uma melhor avaliação para o *drywall*, enquanto os critérios envolvendo durabilidade e custos a favor da alvenaria com blocos cerâmicos, ambos os resultados consoantes com a matriz de decisão. Com exceção dos critérios C11 (sensível a partir de uma variação maior do que 23,11%) e C15 (sensível a partir de uma variação maior do que 26,05%), a análise de sensibilidade dos pesos mostrou que qualquer mudança nos mesmos não alteraria os resultados da sobreclassificação. Os gráficos da análise de sensibilidade estão no Apêndice 5 deste trabalho.

blocos cerâmicos (A9), laje treliçada com isopor (A7), laje em painel (A8) e maciça (A6).

Quadro 10 – Sobreclassificação das lajes analisadas

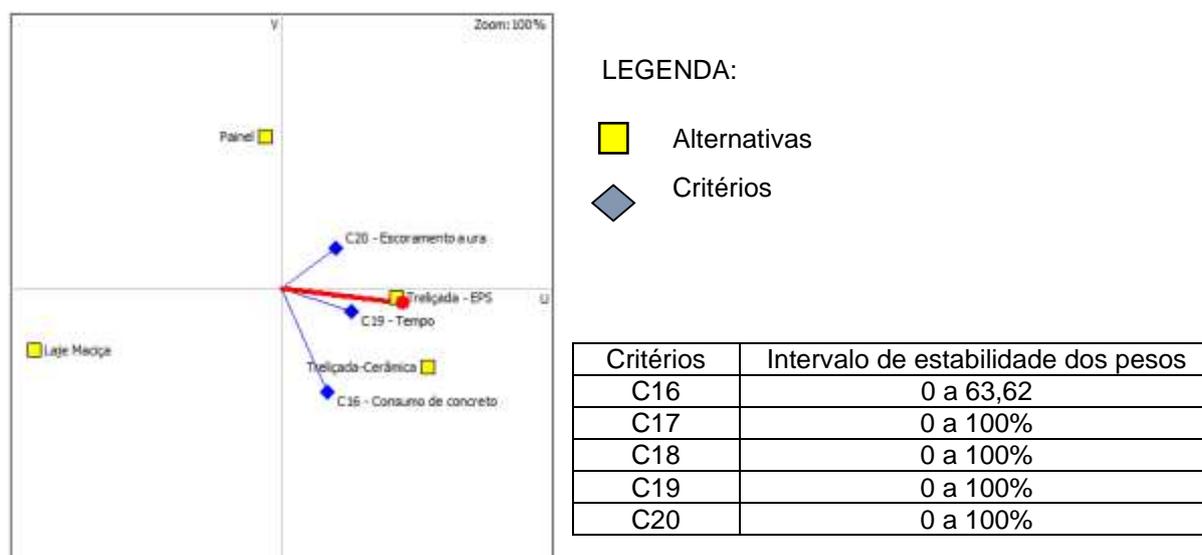
Alternativas	Fluxo Positivo (ϕ^+)	Fluxo Negativo (ϕ^-)	Fluxo líquido (ϕ)	Sobreclassificação
A6	0,0797	0,9203	-0,8407	4º
A7	0,4767	0,0797	0,3970	2º
A8	0,2537	0,3663	-0,1127	3º
A9	0,5563	0,0000	0,5563	1º

Fonte: Autores (2021).

Após a obtenção da sobreclassificação dos sistemas de lajes analisados, foi realizada a representação bidimensional do problema multicritério, proporcionando informação relativa às alternativas, critérios e pesos dos critérios. Obteve-se um nível de qualidade 99,4%, o que significa que os resultados são confiáveis. Conforme observado na Figura 8, os sistemas de lajes treliçadas de EPS e com bloco cerâmico representaram desempenhos homogêneos (proximidade no plano GAIA), o que não foi verificado nos demais sistemas analisados. Isso ocorre por que esses primeiros sistemas, apresentaram ótimos desempenhos nos critérios de consumo de concreto e taxa de armadura.

Com relação aos critérios, observa-se que o tamanho dos vetores dos critérios indica que estes apresentam variâncias aproximadas, influenciando de forma mais homogênea a ordenação final, com exceção do critério consumo de concreto que apresenta uma influência marginalmente superior. Buscando verificar o impacto na análise desenvolvida ao modificar os pesos dos critérios, especificamente no fluxo líquido do método PROMETHEE II, foi realizada a análise de sensibilidade, por ela foi identificado que para todos os critérios obteve-se uma grande amplitude dos intervalos de confiança, revelando a estabilidade da sobreclassificação diante das variações nos pesos dos critérios (os gráficos dessa análise estão no Apêndice 6 deste trabalho).

Figura 8 – Plano GAIA e sensibilidade da seleção das lajes.



Fonte: Autores (2021).

4.3 Análise das relações entre os processos construtivos analisados – seleção do conjunto

Após a classificação individual de cada processo construtivo frente aos critérios específicos, foi obtido um *ranking* das alternativas levando em consideração apenas aspectos internos dos processos analisados. Mas como em uma obra existe a interdependência entre as etapas construtivas, faz-se necessário considerar a relação entre as mesmas, para que exista a maximização da eficiência do fluxo construtivo. Assim, nesta avaliação houve consideração de dois aspectos: o potencial da tecnologia construtiva entre outras do mesmo processo (obtido por meio do ϕ proveniente do PROMETHEE II) e da sinergia entre etapas construtivas diferentes (obtido por meio de um coeficiente k), sendo a relação de valor entre os processos representada pela multiplicação de ϕ e k . Salienta-se que essa sinergia pode diminuir o potencial da tecnologia, caso sejam verificadas restrições técnicas (quando $0 \leq k < 1$) ou aumentá-la (quando $1 < k \leq 1,5$).

O coeficiente k , que variou de 0 a 1,5 neste trabalho, representou as interconexões entre todas as combinações possíveis das alternativas consideradas, por exemplo, se um processo x de fundação for escolhido qual a sinergia para que um processo de alvenaria de vedação y venha ser escolhido? Com essa ligação indo desde o 0, onde essa relação não deve existir, até 1,5, onde não são determinadas restrições entre os processos distintos e existem benefícios dessa ligação. Nessas condições, com base nas relações estabelecidas na Figura 5, no fluxo líquido obtido (Quadros 6, 8 e 10), no fluxo líquido ajustado obtido por meio da Equação 18, considerando um $\varepsilon = 0,05$ e da estimação de valores para o coeficiente k , com base na literatura, a programação linear aplicada a um problema de rede para maximizar o fluxo de valor dos três processos foi utilizado, identificando quais processos devem ser selecionados para compor o conjunto, os dados utilizados estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Dados das interligações entre os processos construtivos analisados

Processos Construtivos	De	Para	k	Fluxo (ϕ)	Fluxo ajustado (ϕ')	Valor
Fundação superficial	0	1	1,000	0,2133	1,1040	1,1040
	0	2	1,000	-0,5609	0,3298	0,3298
	0	3	1,000	0,3477	1,2384	1,2384
Alvenaria de vedação	1	4	0,800	-0,1900	0,7007	0,5606
	1	5	1,100	0,1900	1,0807	1,1888
	2	4	1,000	-0,1900	0,7007	0,7007
	2	5	1,100	0,1900	1,0807	1,1888
	3	4	0,950	-0,1900	0,7007	0,6657
	3	5	1,050	0,1900	1,0807	1,1347
Lajes	4	6	0,900	-0,8407	0,0500	0,0450
	4	7	1,100	0,3970	1,2877	1,4165
	4	8	1,000	-0,1127	0,7780	0,7780
	4	9	0,950	0,5563	1,4470	1,3747
	5	6	1,000	-0,8407	0,0500	0,0500
	5	7	1,200	0,3970	1,2877	1,5452
	5	8	1,000	-0,1127	0,7780	0,7780
	5	9	1,000	0,5563	1,4470	1,4470
Camada Auxiliar	6	10	1,000	1,0000	1,0000	1,0000
	7	10	1,000	1,0000	1,0000	1,0000
	8	10	1,000	1,0000	1,0000	1,0000
	9	10	1,000	1,0000	1,0000	1,0000

Fonte: Autores (2021).

Como apresentado no Quadro 11, na estruturação proposta, a escolha do tipo de fundação ocorreu apenas por meio do PROMETHEE II ($k = 1$). Com a definição do tipo de fundação, a escolha da alvenaria de vedação se deu por meio da tecnologia que acrescentava menor peso na fundação, assim, os coeficientes k para a alvenaria tradicional foram menores do que 1, enquanto que na avaliação do *drywall* obteve-se coeficientes maiores do que 1. Isso ocorreu por que o *drywall* apresenta como característica positiva o baixo peso específico, apresentando um alívio de cargas na estrutura, como verificado por Pereira e Costa (2017) ao analisar um edifício residencial, comparando as cargas estruturais advindas de paredes de vedação vertical interna com alvenaria tradicional e no sistema *drywall*, houve redução de cerca de 8,67% das cargas que eram transmitidas para a subestrutura. Esses autores ainda preveem que, sob o ponto de vista do custo dessa conexão, haverá redução no custo da fundação, devido ao alívio de cargas e no retorno de investimento, já que a execução é mais rápida.

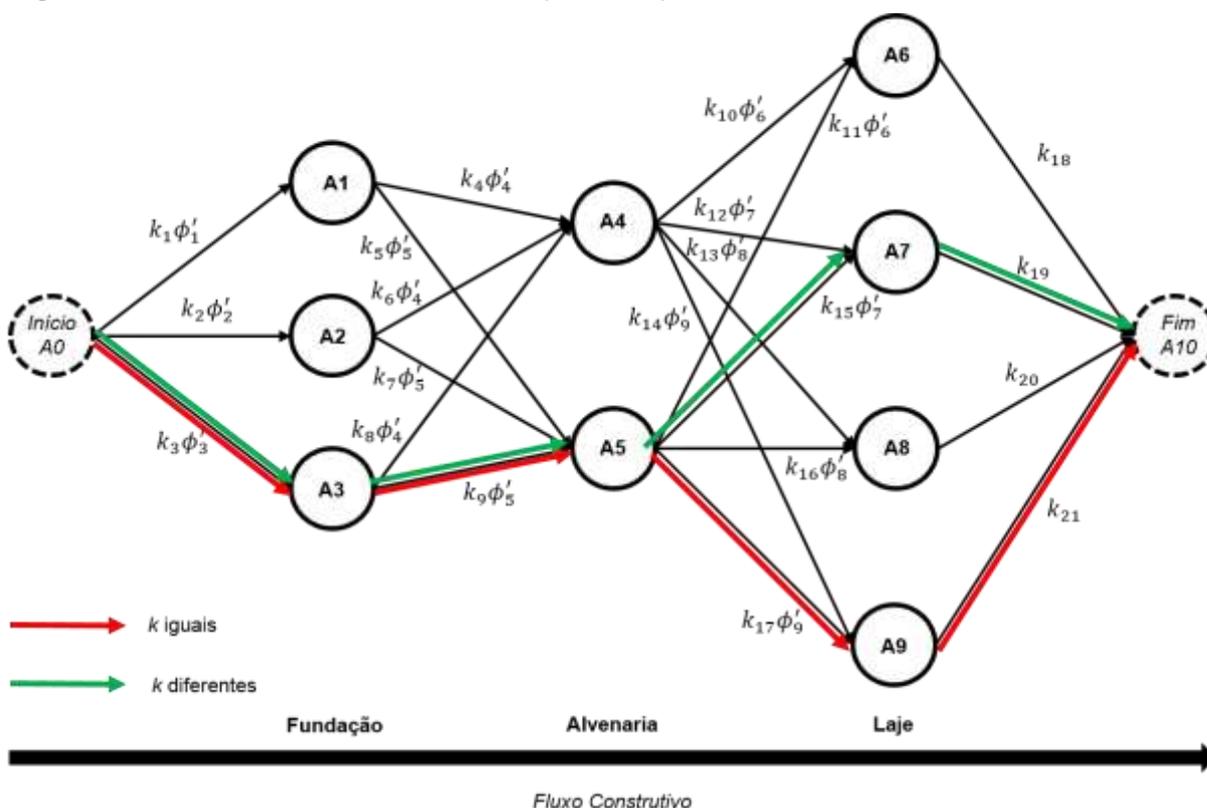
As conexões entre os sistemas de alvenaria de vedação e laje, para os casos onde o sistema *drywall* foi previamente escolhido, obtiveram valores de k maiores ou iguais a 1, pois o aumento dos limites de deslocamento e ângulo de giro possíveis com uso do *drywall*, assim como diminuição da carga e deslocamentos proporcionam a diminuição da espessura das lajes que acarreta diminuição da quantidade de concreto e reduções de custo dos materiais para construção da laje, que podem ser entre 8% a 47%, segundo Bertoncetto *et al.* (2019). Além disso, a laje treliçada com EPS obteve um maior coeficiente k por ser mais leve, quando comparada com as demais opções, sendo este um ponto favorável, uma vez que a fundação da casa vai receber uma carga menor, o que pode resultar em um processo até mais rápido e econômico.

Para as opções em que a alvenaria com blocos cerâmicos foi previamente selecionada, levou-se em consideração apenas os pesos das estruturas da laje, com a laje treliçada com EPS obtendo o maior coeficiente k e as demais variando seus coeficientes entre 0,90 e 1,00.

A partir dessas definições, foram simulados dois cenários. O primeiro cenário, com os coeficientes iguais, $k = 1$, ou seja, com as classificações dos processos construtivos levando em consideração apenas a avaliação isolada, obtidas pelo PROMETHEE II, identificou como conjunto ótimo os processos construtivos: *radier* (fundação superficial) + *drywall* (alvenaria de vedação) + laje treliçada com cerâmica (sistema de laje), obtendo-se um valor máximo da função objetivo de 4,7661. O segundo cenário, levando em consideração a sinergia entre as etapas construtivas, sob a ótica da transmissão de cargas, indicou como conjunto ótimo os processos construtivos: *radier* (fundação superficial) + *drywall* (alvenaria de vedação) + laje treliçada com EPS (sistema de laje), com um valor máximo de 4,9183, devendo essa última opção ser recomendada aos decisores. O grafo com os dois cenários está apresentado na Figura 9.

Salienta-se que as restrições analisadas e simplificações realizadas no modelo desenvolvido neste trabalho foram estabelecidas para nortear o planejamento da obra, servindo de base para que os decisores tomem decisões ótimas, com base nas informações que possuem no momento de concepção do projeto básico. Assim, após essas definições, uma avaliação técnica deve ser realizada, bem como ensaios laboratoriais, sobretudo na etapa de fundação, já que a mesma depende, entre outras coisas, da resistência do solo.

Figura 9 – Caminho de máximo valor para os processos construtivos analisados.



Fonte: Autores (2021).

Além do mais, outra limitação do modelo é que ele considera o fluxo do processo construtivo como linear, mas na verdade podem existir correlações diretas entre nós que não estão conectados no grafo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo apresentar uma proposta de modelo de apoio a decisão para a seleção conjunta de sistemas construtivos. Assim, com base nos trabalhos de Costa (2017), Turskis *et al.* (2016) e Bollella *et al.* (2013), entre outros, foi identificado que os métodos de apoio a decisão vêm sendo utilizados cada vez mais para solucionar problemas dentro da construção civil. Dada a complexidade das atividades desse setor, sobretudo na etapa de planejamento onde as informações ainda não possuem uma definição concisa, foi construído um modelo de decisão a partir do agrupamento de três técnicas principais, o *Fuzzy SWARA*, *PROMETHEE II* e *GAIA*, e a programação linear aplicada a um problema de rede, buscando justificar decisões na construção civil.

O modelo desenvolvido neste trabalho mostrou-se adequado à problemática trabalhada e seus resultados apresentaram consistência, podendo ser facilmente adaptado para inclusão de novas variáveis, alterando seus pesos e matrizes de decisão, dependendo dos interessados e o ambiente em que as decisões são tomadas, o que mostra a sua adaptabilidade da modelagem desenvolvida frente às situações típicas da construção civil, em que cada obra tem características únicas e depende dos insumos disponíveis, do uso da edificação que se pretende construir, da

disponibilidade orçamentária, das características do solo, das cargas, entre outros fatores.

A abordagem metodológica desenvolvida permitiu a aplicabilidade deste modelo como uma ferramenta valiosa a ser usada por gerentes de obras e engenheiros em seu dia a dia, bem como para a tomada de decisões e avaliação de desempenho, que contém várias alternativas e vários critérios, por meio de uma sistemática com procedimentos estruturados (sequência de etapas) e de fácil aplicação computacional, por meio do uso dos *softwares Microsoft Excel 2013® Visual PROMETHEE® Academic*. Salienta-se que, com algumas adaptações, os métodos utilizados aqui podem ser construídos em uma única plataforma, seja em um ambiente de programa mais sofisticado, como no *MatLab®* ou na linguagem *Phyton*, ou até mesmo em uma única planilha do *Microsoft Excel®*, com essa última sendo uma possibilidade mais próxima do dia-a-dia da construção civil.

Para o caso analisado neste trabalho, ao levar em consideração a sinergia entre processos construtivos diferentes, foi obtido um conjunto ótimo diferente daquele obtido apenas pela aplicação isolada do método de sobreclassificação utilizado. Isso mostrou o quanto as etapas construtivas são interdependentes e uma avaliação criteriosa, numérica e holística se faz necessário já na etapa de planejamento, pois todo o sistema está interligado e trabalham em conjunto para oferecer segurança e conforto às pessoas. Salienta-se que os resultados obtidos servem de norte para o planejamento de uma edificação, sendo necessário a realização de estudos técnicos, com ensaios de investigação geotécnica para definição mais precisa das soluções de fundações possíveis. Além do mais, a metodologia desenvolvida depende fortemente que os dados de entrada sejam confiáveis para que se obtenha resultados consistentes, não podendo ser feitas inferências dos resultados, já que cada obra possui características singulares.

Com o desenvolvimento do modelo analítico e numérico neste trabalho é possível, em estudos futuros, a construção de modelos de gerenciamento mais adaptativos, com base em restrições e interdependências existentes entre as etapas construtivas, e já identificadas no processo de planejamento com o modelo proposto, além do mais, com base na modelagem realizada neste trabalho é possível em estudos futuros:

- Do ponto de vista da aplicação é possível utilizar o modelo apresentado nesta pesquisa em outros empreendimentos, com a incorporação de outros processos construtivos e, conseqüentemente, com outros critérios e alternativas. Por exemplo, a aplicação em casos onde a edificação necessite de uma fundação profunda, onde existem diversas opções técnicas possíveis (estaca, hélice contínua, por exemplo) com desempenhos diferentes frente ao modo de cravação e materiais utilizados, com a incorporação de critérios geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, tipo de solo, disponibilidade de espaço no terreno, por exemplo), econômicos, estruturais (geometria do prédio, cargas, *layout* da edificação, por exemplo) construtivas, entre outros. O mesmo raciocínio serve para o projeto estrutural (como por exemplo, alvenaria estrutural, paredes de concreto, sistema convencional de vigas e pilares). Além do mais, podem ser avaliadas tecnologias mistas, como o *radier* estaqueado e identificação de outras restrições entre as etapas construtivas (ou da sinergia entre elas), a serem elicitadas pelos especialistas na programação linear desenvolvida. Por fim, outra possibilidade de aplicação da metodologia

desenvolvida neste trabalho é para o caso de edifícios altos e construções de grande porte, em que se tem grande complexidade e incertezas.

- Do ponto de vista da agregação dos dados é possível aplicar o modelo desenvolvido neste trabalho para o contexto de decisões em grupo, onde as matrizes de decisão para os processos construtivos podem ser construídas por diferentes engenheiros, conforme a sua especialidade (engenheiro de projeto estrutural, geotécnico, fiscal, planejamento, por exemplo), além de critérios técnicos, e depois unidas por meio de uma extensão do PROMETHEE, a sua versão GDSS (*Group Decision Support System*), desenvolvido por Brans, Macharis e Mareschal (1998).
- Do ponto de vista da modelagem é possível o uso de programação dinâmica, no lugar da programação linear, para um melhor delineamento da recursividade entre os processos construtivos, bem como considerar outras restrições construtivas e outras formas relacionais no grafo, por exemplo, fazer uma análise no fluxo construtivo normal (fundação – alvenaria – lajes) e inverso (laje – alvenaria – fundação, por exemplo). Além disso, é possível incorporar a lógica *fuzzy* no modelo PROMETHEE, visando incorporar incertezas no processo de sobreclassificação.
- A modelagem desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada em obras que utilizam a metodologia BIM (*Building Information Modeling*) para uma verificação mais acurada e técnica das interconexões das etapas construtivas, visando complementar e agregar valor para o gerenciamento e a execução da obra.

REFERÊNCIAS

- AGHDAIE, M. H.; ZOLFANI, S. H.; ZAVADSKAS, E. K. Decision making in machine tool selection: an integrated approach with SWARA and COPRAS-G methods, **Engineering Economics**, v. 24, n. 1, p. 5–17, 2013.
- ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações**. São Paulo: Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T.; VETSCHERA, R. A note on scale transformations in the PROMETHEE V method. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 1, p.198-200, 2012.
- ALMEIDA, A. T. **O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão**. Editora Universitária UFPE. 2010.
- AQUINO, J. T. *et al.* Avaliando Alternativas de alvenaria de vedação em edificações usando o método PROMETHEE. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 60, 2018. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, p. 1-14, 2018.
- AQUINO, J. T. *et al.* Evaluation of Quality in Public Transport Services: the use of quality dimensions as an input for Fuzzy TOPSIS. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 21, p. 176-193, 2019.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. Rio Grande: Dunas, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4**. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto-procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BELFIORE, P., FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de administração, contabilidade e economia**, Elsevier, Rio de Janeiro, 2012.
- BERTONCELLO, P. S. *et al.* Comparativo técnico entre laje maciça e nervurada com vedação vertical interna em alvenaria ou *drywall*. **Revista CIATEC – UPF**, v.11, n. 3, p.13-28, 2019.
- BOLLELLA, A. F. *et al.* O uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de sistemas de lajes de edifícios comerciais. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, vol. 13, nº 1, p. 39-52, 2013.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P. H.; MARESCHAL, B., How to select and how to rank project: the PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, 24, p. 228-238, 1986.
- BRANS, J. P.; MACHARIS, C.; MARESCHAL, B. The GDSS PROMETHEE procedure: a PROMETHEE-GAIA based procedure for group decision support. **Journal of Decision Systems**, n. 7, p. 283-307, 1998.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI, **Tabela de insumos para o mês de maio de 2020** – Pernambuco. Caixa, 2020.
- COSTA, R. C. **Avaliação multicritério dos sistemas construtivos para construção de casas pré-fabricadas**, 2017, 76 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Produção). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

COSTA, O. V. **Estudo de alternativas de projetos estruturais em concreto armado para uma mesma edificação**, 1997, 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1997.

CRUZ, R. B. C.; BALLARDIE, J. C.; SALVADOR, F. A. A. Aplicação do método AHP na tomada de decisão na seleção de sistemas de fundação profunda de edifícios. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 19, n. 1, p. 3-17, 2019.

D'AGOSTINI, G. R. **Estudo comparativo de sapatas isoladas e radier flexível como fundações em casas populares: estudo de caso**, 2018, 124 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

DORNELES, D. M., **Lajes na construção civil brasileira: estudo de caso em edifício residencial em Santa Maria – RS**, 2014, 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Civil), Rio Grande do Sul, 2014.

FÉLIX, F. R. R. **Modelo de tomada de decisão para seleção de sistema construtivo para habitação de interesse social**. 2017, 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FISHBURN, P. C. Noncompensatory Preferences. **Synthese**. v. 33, n. 1, p. 393–403, 1976.

FONTENELLE, E.; MELHADO, S. B. Proposta para sistematização de informações e decisões nas etapas iniciais do processo de projeto de edifícios. *In*: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 8, 2000. **Anais [...]**. Salvador, p. 666-673, 2000.

FORMIGONI, D. D. P. **Análise comparativa do desempenho de fundação rasa do tipo radier com fundação rasa de sapatas isoladas**. 2009, 67p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HAYES, Q.; MARESCHAL, B.; SMET, Y. D. **New GAIA Visualization Methods**. *In*: 13th International Conference Information Visualisation, Belgium, 2009.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**, McGraw-Hill, São Paulo, 2006.

IGHRAVWE, D. E.; OKE, S. A. A multicriteria decision-making framework for selecting a suitable maintenance strategy for public buildings using sustainability criteria. **Journal of Building Engineering**, v. 24, p. 1-18, 2019.

KERSULIENE, V.; ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA), **Journal of Business Economics and Management**, v. 11, n. 2, p. 243–258, 2010.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**, Campus, 2009.

LAU, H. C. W. *et al.* A fuzzy multi-criteria decision support procedure for enhancing information delivery in extended enterprise networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 16, n. 1, p. 1–9, 2003.

LIMA, M. C. **Monografia**: a engenharia da produção acadêmica. São Paulo: Saraiva, 2008.

MAANEN, J. **Qualitative methodology**. Sage Publications, Newbury Park, 1983.

MARESCHAL, B.; BRANS, J. P. Geometrical representations for MCDA, **European Journal of Operational Research**, 34, 69-77, 1988.

MATTANA, A. J. *et al.* Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 63-79, 2012.

MATTOS, A. D. **Planejamento e controle de obras**. São Paulo: PINI, 2010.

MAVI, R. K.; GOH, M.; ZARBAKSHNIA, N. Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 5–8, p. 2401–2418, 2017.

MILLER, D. **Handbook of Research Design and Sociological Measurement**. Library of Congress Cataloging in Publication data, USA, 1978.

MOGHTADERNEJAD, S.; MIRZA, M. S.; CHOUINARD, L. E. Determination of the fuzzy measures for multicriteria and optimal design of a building façade using Choquet integrals. **Journal of Building Engineering**, v. 26, p. 1-22, 2019.

PAN, N. F. *Fuzzy* AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. **Automation in Construction**, n. 17, p. 958–965, 2008.

PEREIRA, F.; COSTA, L.F. **Análise das cargas em um edifício de concreto armado, quando comparado a utilização de paredes de vedação interna de alvenaria convencional e drywall**, 2017, 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017.

POLITO, G. **Gerenciamento de obras**: boas práticas para a melhoria da qualidade e da produtividade. São Paulo: PINI, 2015.

SABBATINI, F. H. **Notas de aula** - Tecnologia de produção das vedações verticais, 1997.

SABBATINI, F. H. **Tecnologia das construções de edifícios I**, PCC-2435, 2003.

SANTOS, L. F.; CRUZ, R. B. C. O uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de sistemas de lajes de edifícios comerciais. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 13, n.1, p. 39-52, 2013.

SILVA, S. H. L. *et al.* Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica, **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 3, p.174 – 189, 2015.

SILVA, L. B. L.; ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, A. T. Uso do conceito *c-optimal* para seleção de *portfólio* de projetos na construção civil com base no método multicritério PROMETHEE V. *In*: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 47, 2015. **Anais [...]**. Porto de Galinha, p. 1-15, 2015.

- SILVA, S. D. **Estudo sobre análise de risco em fundações por estacas**, 2018, 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- SILVA, C. F. D.; BATISTA, D. A.; MEDEIROS, D. D. A proposed method to evaluate the quality of services using Fuzzy sets theory. **Quality & Quantity**. v. 48, pp. 871-885, 2014.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Blucher – FAPESP, 2007.
- SOUSA, R. S.; SILVA, C. T. L.; ARENALES, M. N. Métodos do tipo dual simplex para problemas de otimização linear canalizados. **Pesquisa Operacional**, 25, 349-382, 2005.
- TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**, Pearson, São Paulo, 2008.
- TURSKIS, Z. *et al.* Multicriteria Evaluation of Building Foundation Alternatives, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 31, n.9, p. 1-13, 2016.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Bookman. Porto Alegre, 2015.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- ZAVADSKAS, E. K. *et al.* Model for residential house element and material selection by neutrosophic MULTIMOORA method, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 64, p. 315-324, 2017.
- ZOPOUNIDIS, C.; DOUMPOS, M. A multicriteria decision aid methodology for sorting decision problems: the case of financial distress. **Computational Economics**, vol. 14, nº 3, p. 197–218, 1999.

APÊNDICE

Apêndice 1 - Memória de Cálculo da ponderação dos critérios para a escolha da fundação pelo método *Fuzzy SWARA*.

Quadro 12 – Memória de cálculo do método Fuzzy SWARA (fundação)

Critérios	Número Fuzzy			Termo Linguístico	Crisp
	-	-	-		
Taxa de armadura (C2)	-	-	-	-	-
Consumo de concreto (C1)	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
Horas (C4)	0	0,25	0,75	Poucos menos importante	0,291667
Taxa de forma (C3)	0	0,25	0,75	Poucos menos importante	0,291667

Critérios	sij	kij	qij	PESOS
Taxa de armadura (C2)	-	1	1,000	0,305006
Consumo de concreto (C1)	0,04	1,04	0,960	0,292806
Horas (C4)	0,29	1,29	0,7432	0,22700
Taxa de forma (C3)	0,29	1,29	0,5754	0,175501
TOTAL				1,0000

Fonte: Autores (2021).

Apêndice 2 - Memória de Cálculo da ponderação dos critérios para a escolha da alvenaria de vedação pelo método *Fuzzy SWARA*.

Quadro 13 – Memória de cálculo do método Fuzzy SWARA (alvenaria)

Critérios	Número Fuzzy			Termo Linguístico	Crisp
	-	-	-		
C15 - Custo de execução por m ²	-	-	-	-	-
C14 - Economia de material e mão-de-obra	0	0	0	Igualmente importante	0
C5 - Estabilidade e resistência estrutural	0	0	0	Igualmente importante	0
C6 - Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
C9 - Desempenho térmico	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
C10 - Desempenho acústico	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
C11 - Durabilidade	0	0,25	0,5	Pouco menos importante	0,25
C12 - Manutenibilidade	0,25	0,5	0,75	Menos importante	0,5
C13 - Conforto tátil e adaptação ergonômica	0	0	0	Igualmente importante	0
C8 - Umidade nas vedações verticais internas	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
C7 - Capacidade de combate a incêndio	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667

Critérios	sij	kij	qij	PESOS
C15 - Custo de execução por m ²	-	1	1,000	0,120
C14 - Economia de material e mão-de-obra	0	1	1,000	0,120
C5 - Estabilidade e resistência estrutural	0	1	1,000	0,120
C6 - Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas	0,04	1,04	0,960	0,116
C9 - Desempenho térmico	0,04	1,04	0,922	0,111
C10 - Desempenho acústico	0,04	1,04	0,885	0,107
C11 - Durabilidade	0,25	1,25	0,708	0,085
C12 - Manutenibilidade	0,5	1,5	0,472	0,057
C13 - Conforto tátil e adaptação ergonômica	0	1	0,472	0,057
C8 - Umidade nas vedações verticais internas	0,04	1,04	0,453	0,055
C7 - Capacidade de combate a incêndio	0,04	1,04	0,435	0,052
TOTAL				1,0000

Fonte: Autores (2021).

Apêndice 3 - Memória de Cálculo da ponderação dos critérios para a escolha do sistema de laje pelo método *Fuzzy SWARA*.

Quadro 14 – Memória de cálculo do método *Fuzzy SWARA* (laje)

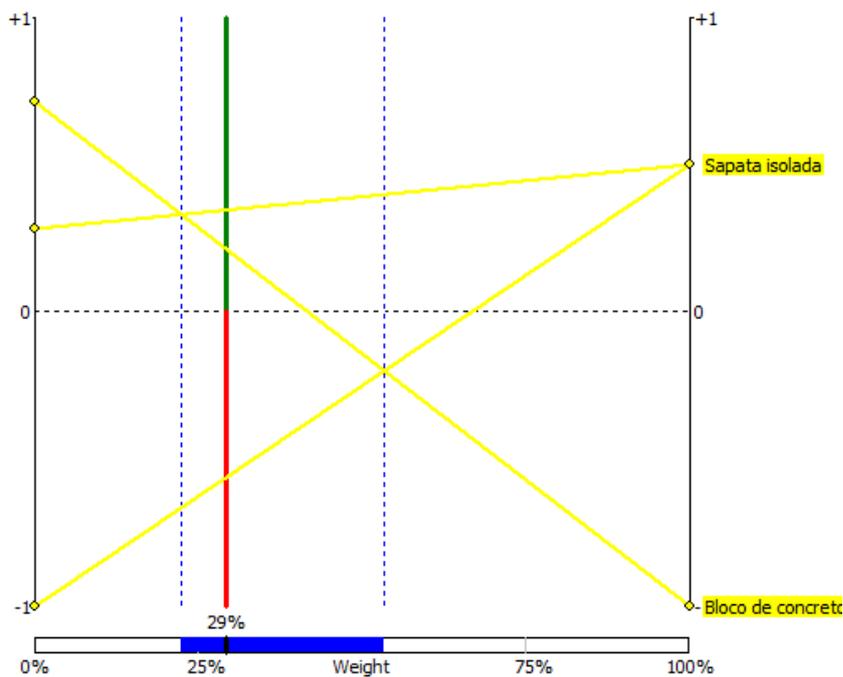
Critérios	Número Fuzzy			Termo Linguístico	Crisp
C17 - Taxa de armadura (kg/m ²)	-	-	-	-	-
C16 - Consumo de concreto (m ³ /m ²)	0	0	0	Igualmente importante	0
C19 - Tempo de execução	0	0,25	0,5	Pouco menos importante	0,25
C18 - Taxa de forma (m ² /m ²)	0	0	0,25	Pouquíssimo menos importante	0,041667
C20 - Necessidade de escoramento	0	0,25	0,5	Pouco menos importante	0,25

	sij	kij	qij	PESOS
C17 - Taxa de armadura (kg/m ²)	-	1	1,000	0,239
C16 - Consumo de concreto (m ³ /m ²)	0	1	1,000	0,239
C19 - Tempo de execução	0,25	1,25	0,800	0,191
C18 - Taxa de forma (m ² /m ²)	0,04	1,04	0,768	0,184
C20 - Necessidade de escoramento	0,25	1,25	0,614	0,147
TOTAL				1,0000

Fonte: Autores (2021).

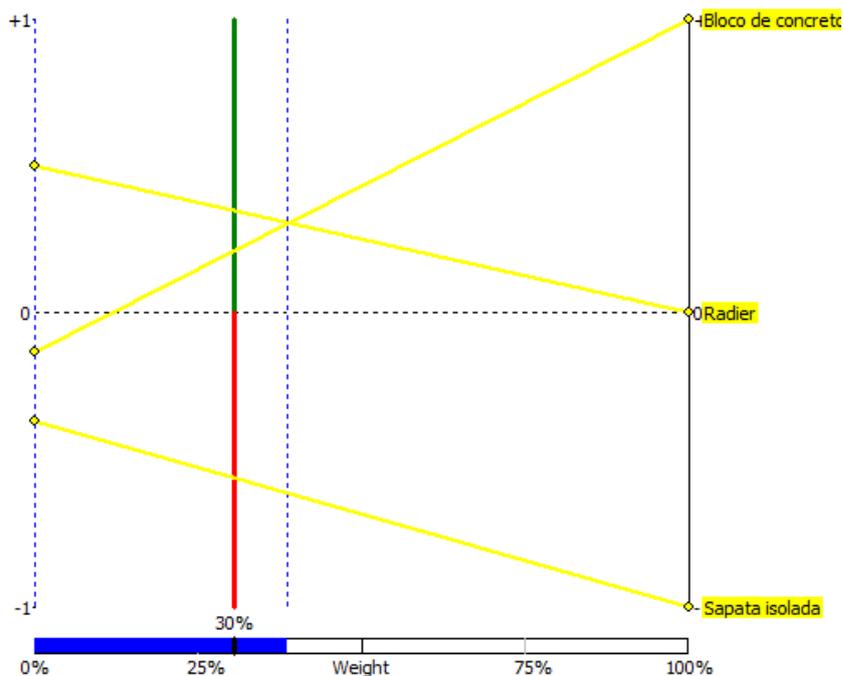
Apêndice 4 - Resultados da análise de sensibilidade do método PROMETHEE II para a escolha da fundação

Figura 10 – Análise de sensibilidade para o critério consumo de concreto



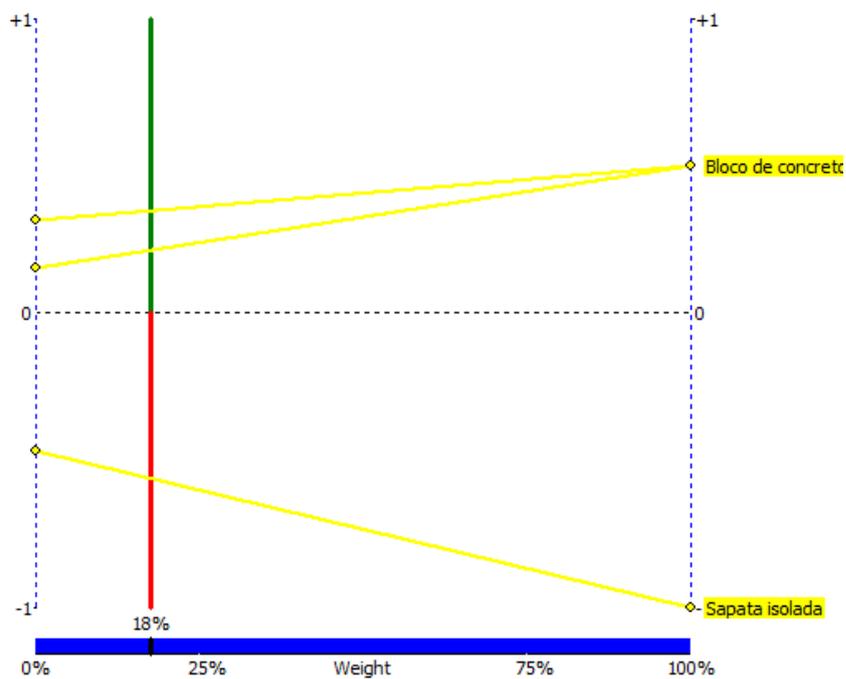
Fonte: Autores (2021).

Figura 11 – Análise de sensibilidade para o critério taxa de armadura



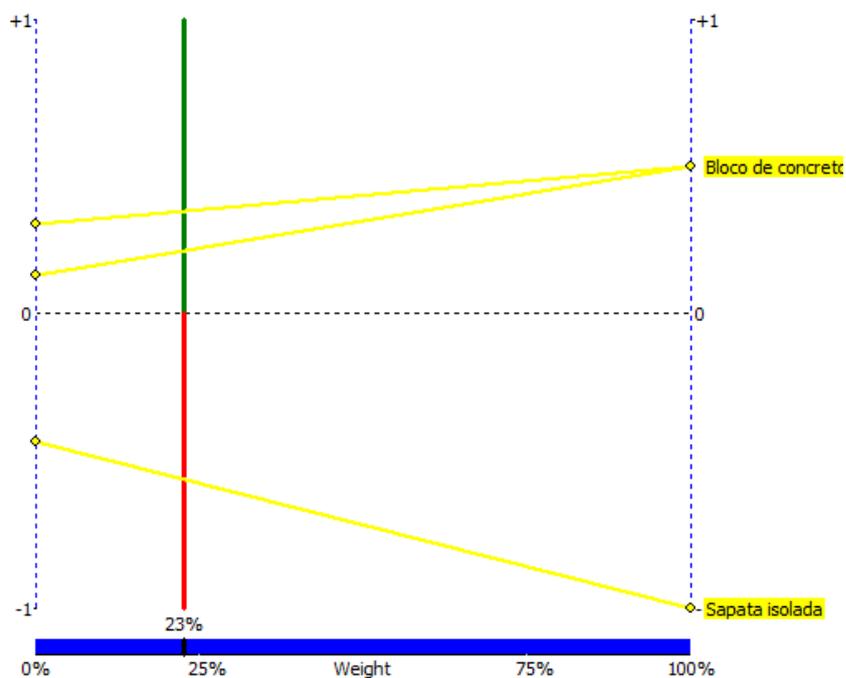
Fonte: Autores (2021).

Figura 12 – Análise de sensibilidade para o critério taxa de forma



Fonte: Autores (2021).

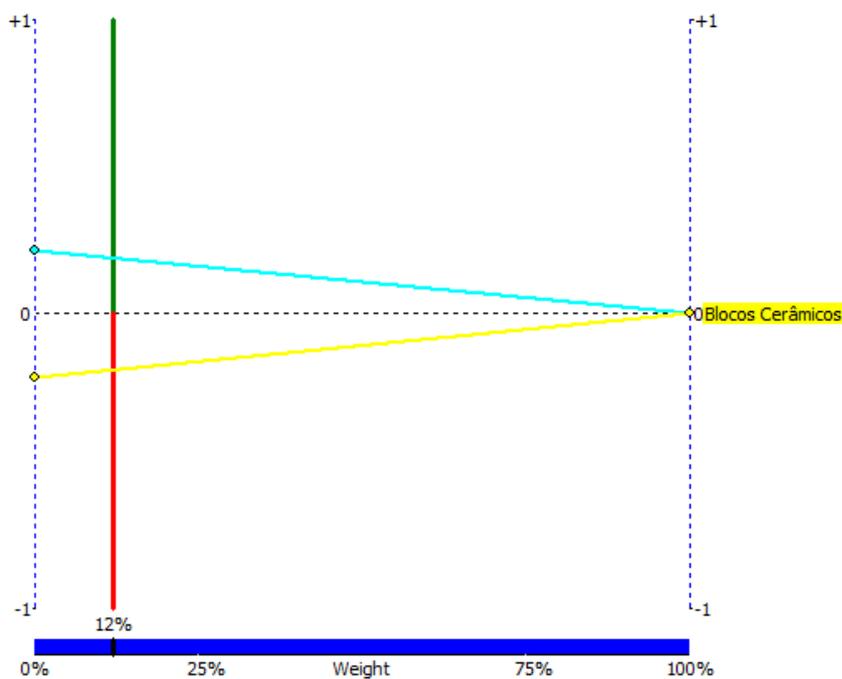
Figura 13 – Análise de sensibilidade para o critério horas de trabalho



Fonte: Autores (2021).

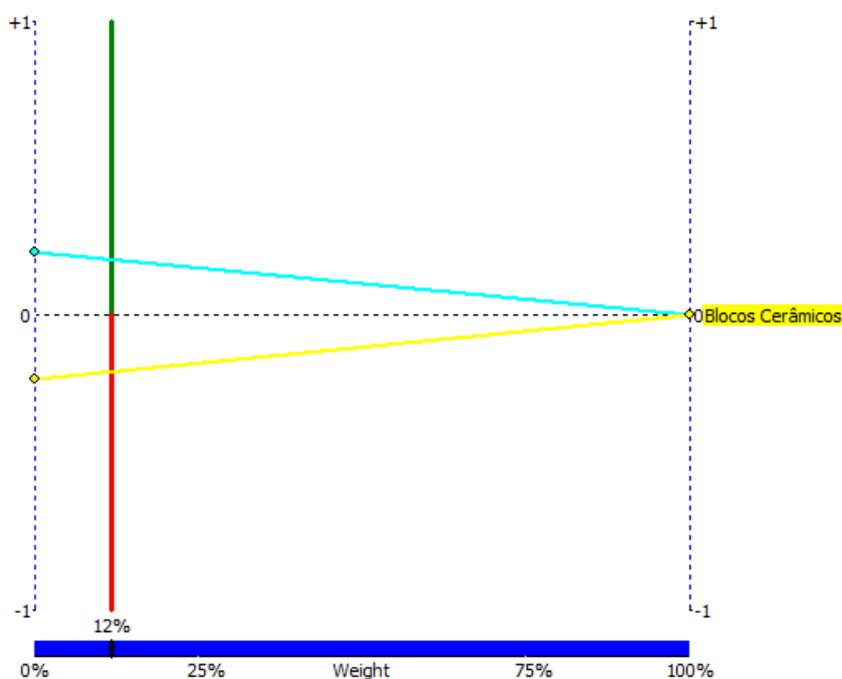
Apêndice 5 - Resultados da análise de sensibilidade do método PROMETHEE II para a escolha da alvenaria de vedação

Figura 14 – Análise de sensibilidade para o critério estabilidade



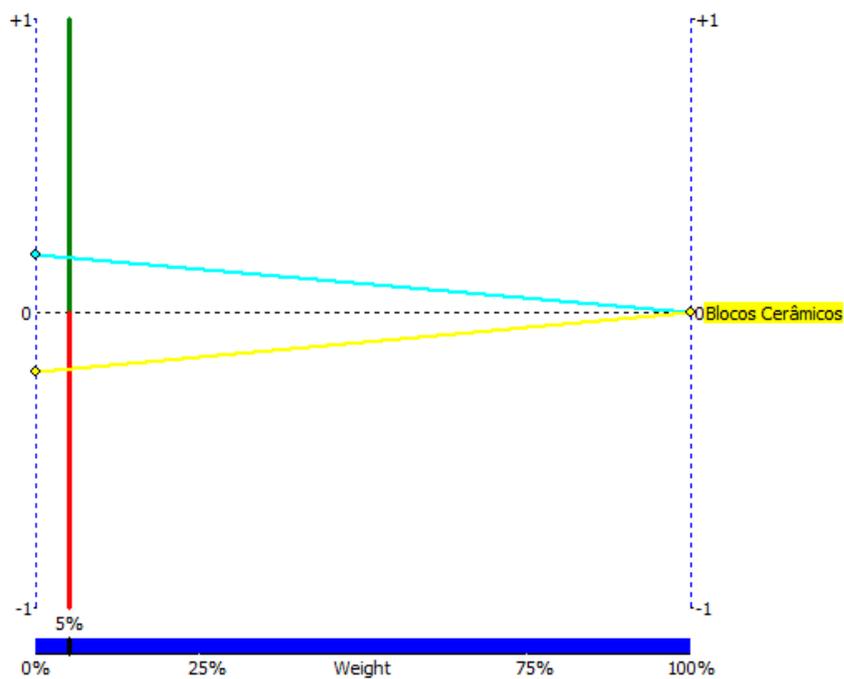
Fonte: Autores (2021).

Figura 15 – Análise de sensibilidade para o critério deslocamentos



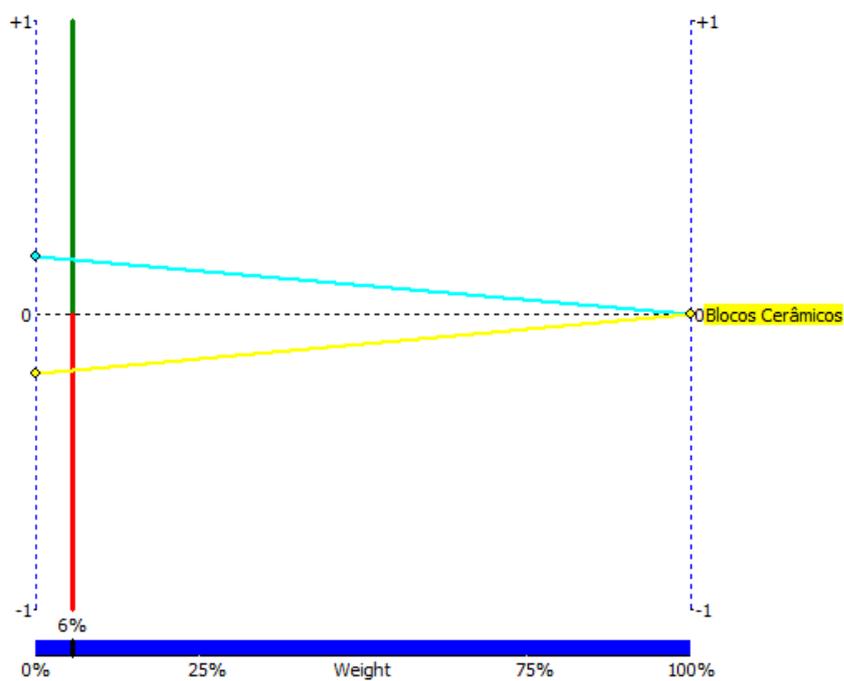
Fonte: Autores (2021).

Figura 16 – Análise de sensibilidade para o critério combate a incêndio



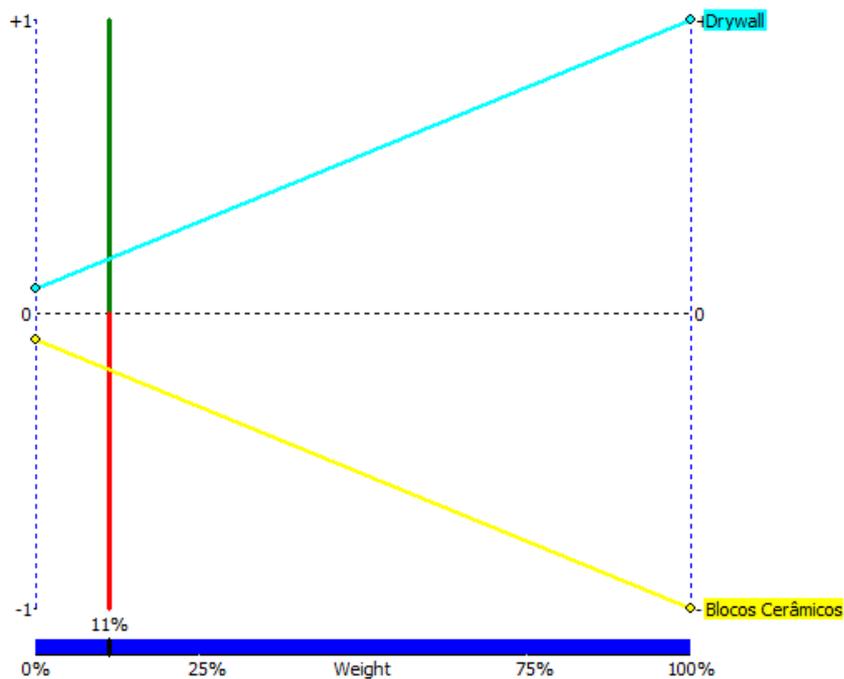
Fonte: Autores (2021).

Figura 17 – Análise de sensibilidade para o critério umidade



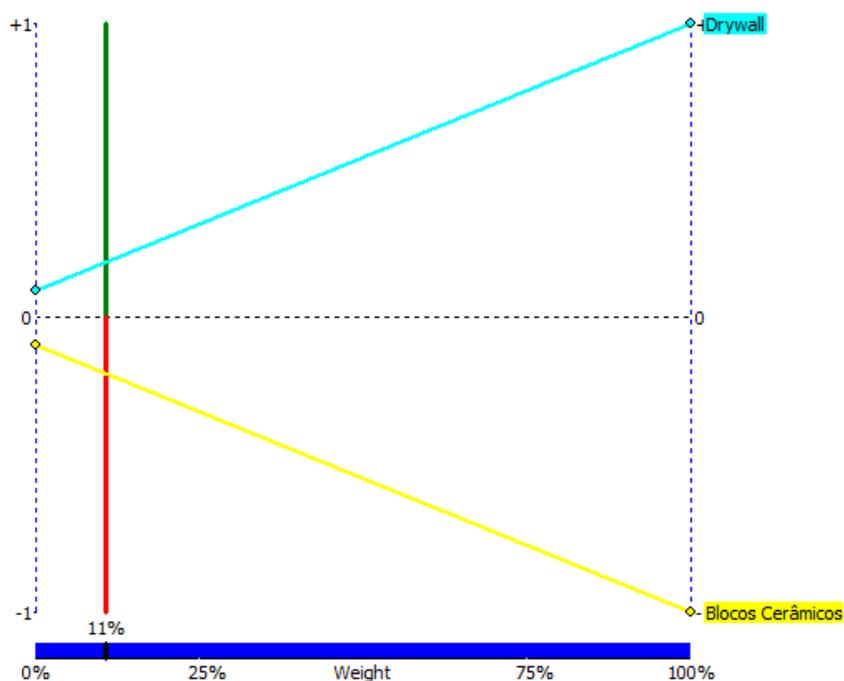
Fonte: Autores (2021).

Figura 18 – Análise de sensibilidade para o critério desempenho térmico



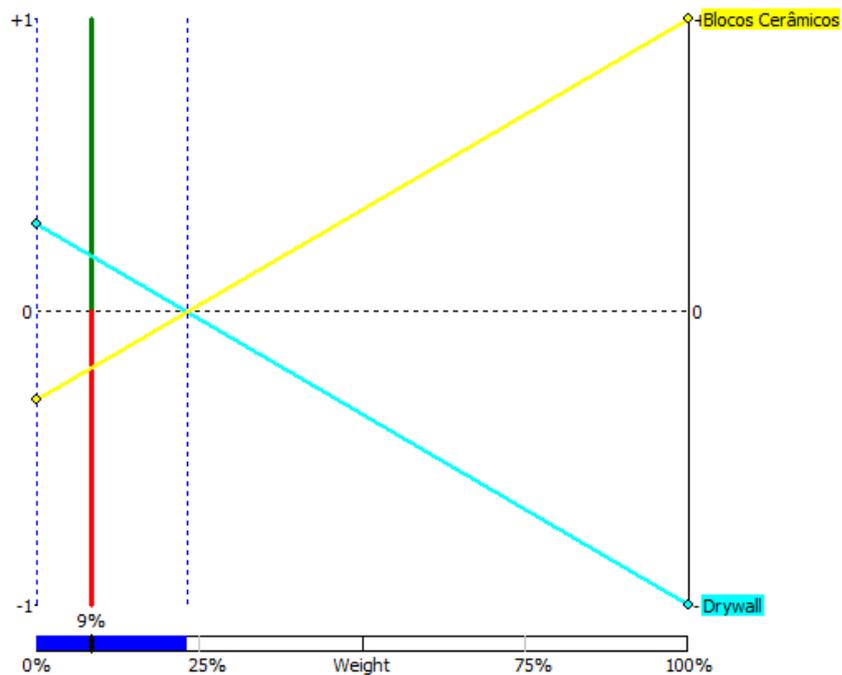
Fonte: Autores (2021).

Figura 19 – Análise de sensibilidade para o critério desempenho acústico



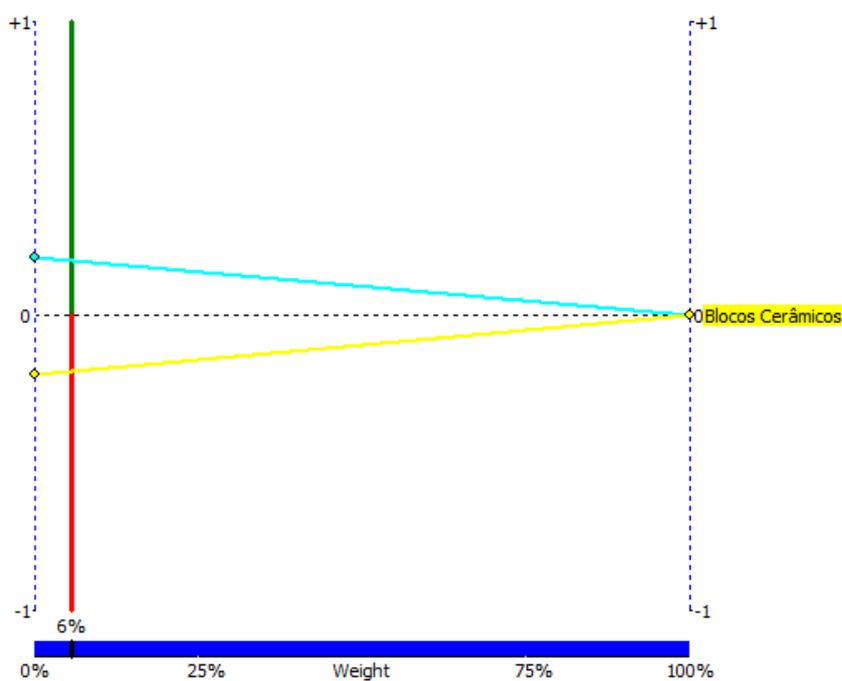
Fonte: Autores (2021).

Figura 20 – Análise de sensibilidade para o critério durabilidade



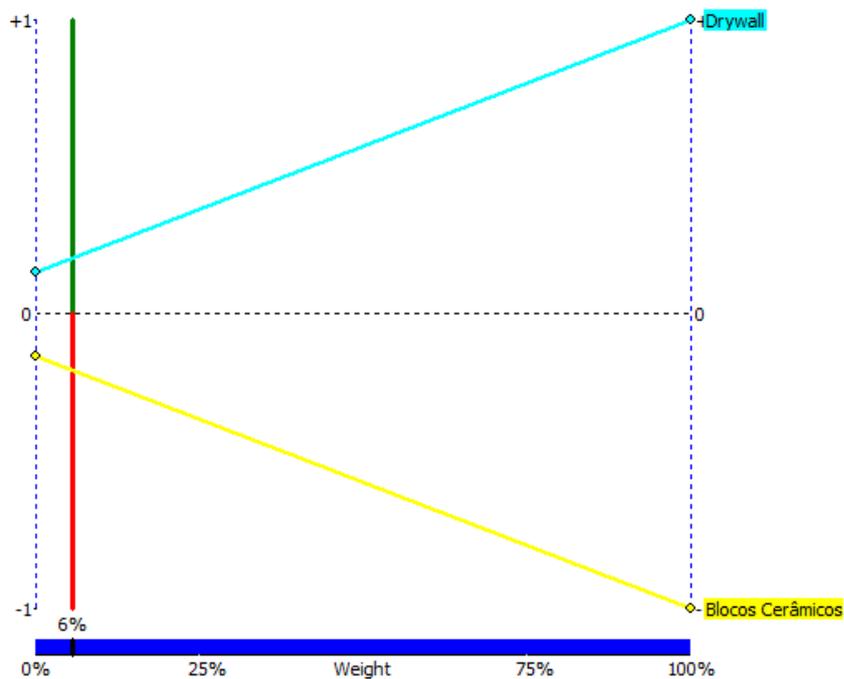
Fonte: Autores (2021).

Figura 21 – Análise de sensibilidade para o critério manutenibilidade



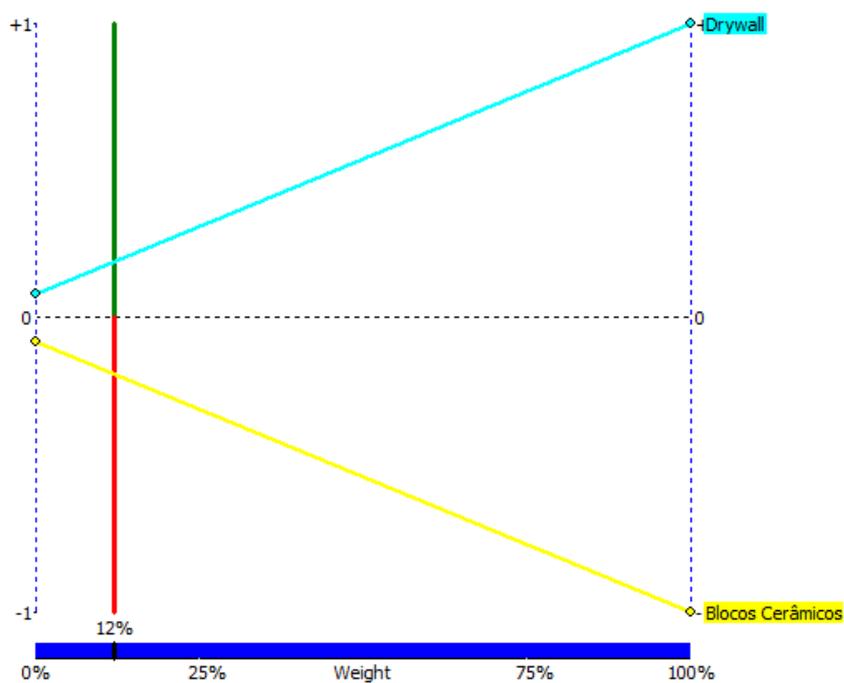
Fonte: Autores (2021).

Figura 22 – Análise de sensibilidade para o critério conforto tátil



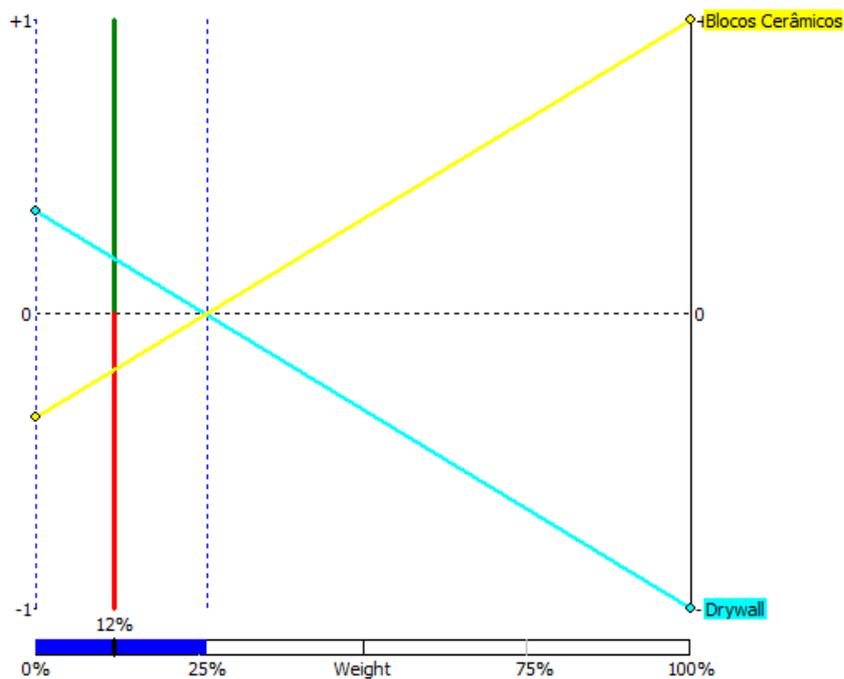
Fonte: Autores (2021).

Figura 23 – Análise de sensibilidade para o critério economia



Fonte: Autores (2021).

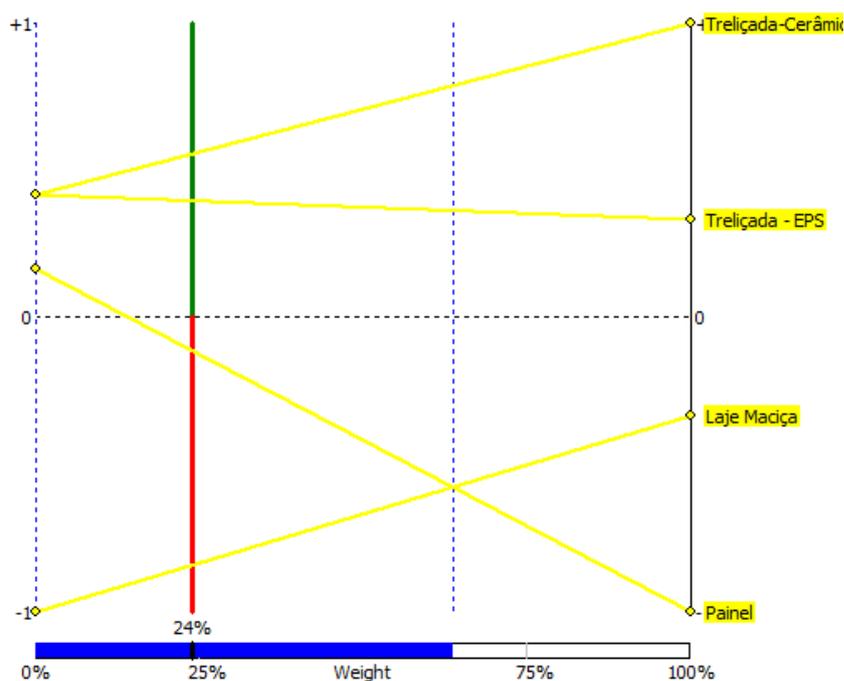
Figura 24 – Análise de sensibilidade para o critério custo



Fonte: Autores (2021).

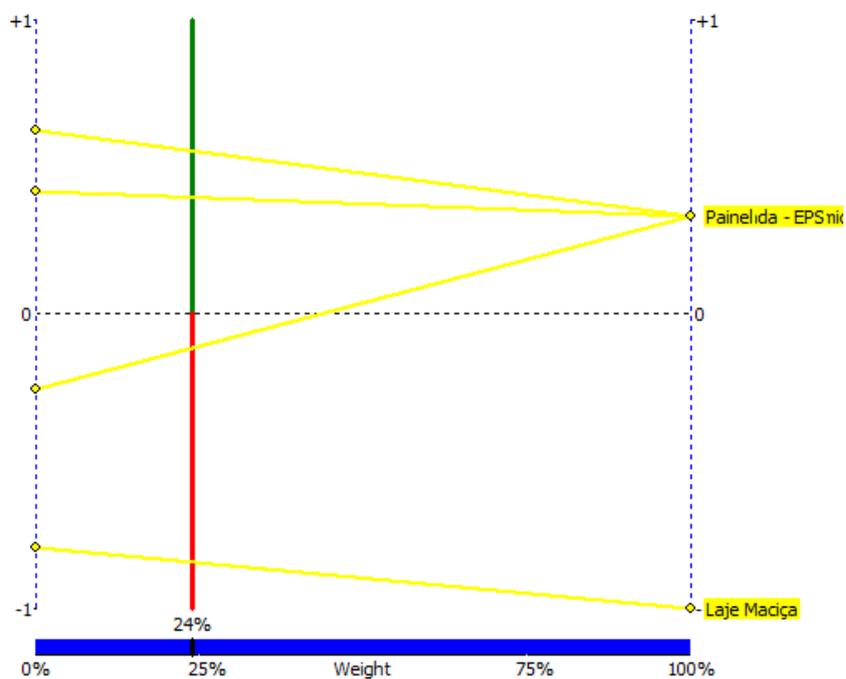
Apêndice 6 - Resultados da análise de sensibilidade do método PROMETHEE II para a escolha do tipo de laje

Figura 25 – Análise de sensibilidade para o critério consumo de concreto



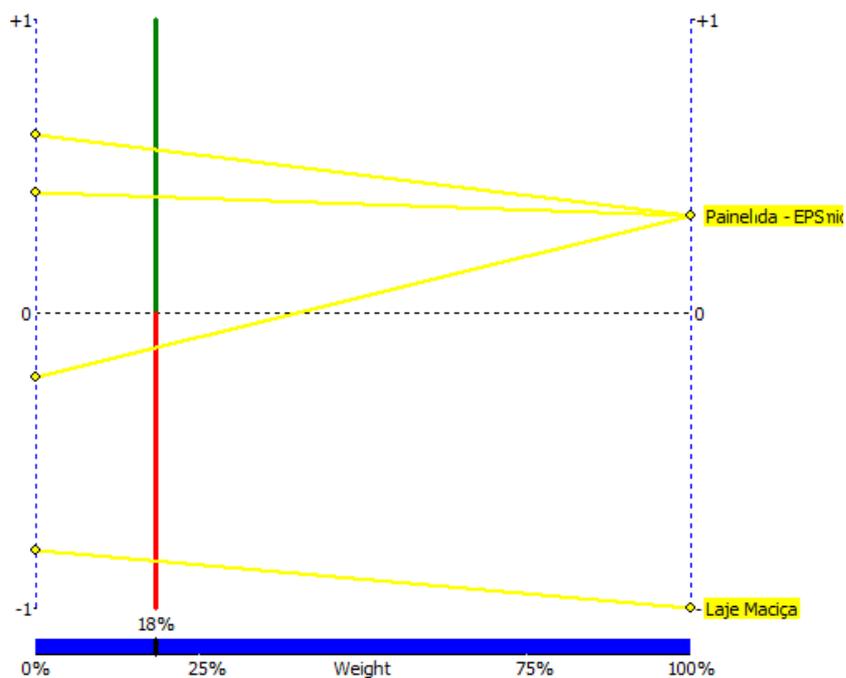
Fonte: Autores (2021).

Figura 26 – Análise de sensibilidade para o critério taxa de armadura



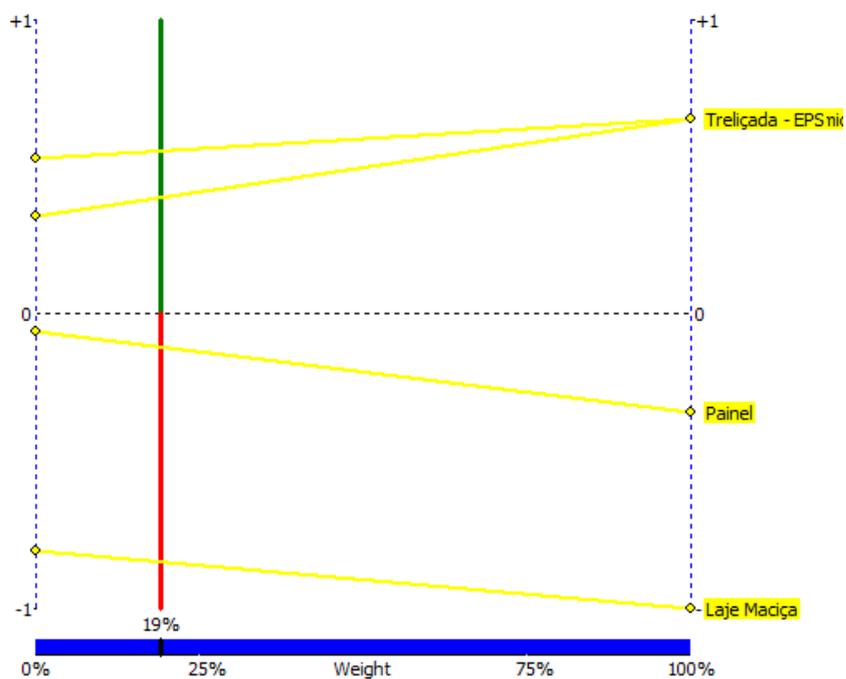
Fonte: Autores (2021).

Figura 27 – Análise de sensibilidade para o critério taxa de forma



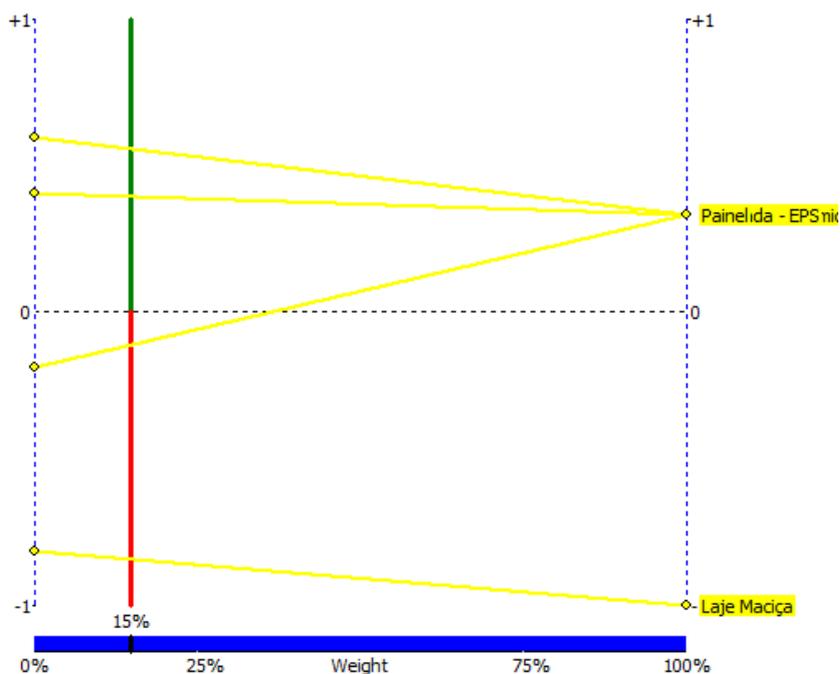
Fonte: Autores (2021).

Figura 28 – Análise de sensibilidade para o critério tempo



Fonte: Autores (2021).

Figura 29 – Análise de sensibilidade para o critério escoramento



Fonte: Autores (2021).